LEFRAND . POINSARD . AUCLERC

ÉLECTRICITÉ

COURANT CONTINU

ÉLECTROCINÉTIQUE
MAGNÉTISME - ÉLECTROMAGNÉTISME
MACHINES A COURANT CONTINU

FOUCHER - PARIS

Édouard LEFRAND
Professeur d'électricité industrielle
au Conservatoire National des Arts et Métiers.

Jean POINSARD
Professeur à l'École Nationale
de Radiotechnique
et d'Électricité appliquée, Clichy.

Georges AUCLERC
Professeur d'électricité
à l'École Diderot,
Paris.

ÉLECTRICITÉ

COURANT CONTINU

Électrocinétique — Magnétisme — Électromagnétisme
Machines à courant continu

Conforme au programme de 2e I. des Collèges techniques;
des Sections techniques des Lycées et des Collèges;
des Cours complémentaires industriels.

LES ÉDITIONS FOUCHER
128, rue de Rivoli, Paris

AVERTISSEMENT

Cet ouvrage, dans lequel nous avons renoncé aux simplifications commodes, mais dangereuses pour l'avenir, présente les notions et les lois élémentaires de l'électrotechnique en vue des applications industrielles.

Le sens traditionnel du courant, arbitrairement choisi, peut conduire à de sérieuses inconséquences : dans les circuits où l'on rencontre, à la fois, des « courants ordinaires » de conduction et des « courants électroniques » dans le vide, on est conduit à dire que les électrons vont en sens inverse du courant qu'ils constituent eux-mêmes. Dans ces conditions, il apparaît normal de prendre comme sens du courant celui du déplacement des électrons.

— Les lois fondamentales sont déduites de l'expérience et contrôlées par application du principe de la conservation de l'énergie.

— Les images concrètes sont empruntées à la théorie électronique, dont les applications envahissent le monde industriel.

— Les lois de l'électromagnétisme sont abordées par la notion de flux magnétique, grandeur-clé, d'où se déduit la densité de flux ou induction magnétique.

Nous avons développé la loi du circuit magnétique; purement technique, elle seule permet de calculer les circuits magnétiques des machines. L'analogie entre cette loi et celle du circuit électrique est un puissant moyen d'enseignement ; il pourra s'étendre à l'étude des isolants (flux électrique).

Le système d'unités utilisé est le système industriel M. K. S. A. Le vocabulaire et les symboles sont ceux du vocabulaire électrotechnique français ; les symboles graphiques, les règles et principes d'écriture des nombres, des unités et des grandeurs sont ceux de l'Association Française de Normalisation.

Ainsi conçu, ce cours d'Électricité, conforme au programme de septembre 1953, relatif à la classe de seconde technique industrielle, sera des plus utiles aux techniciens des industries électriques, servira à l'initiation des élèves des cours publics et préparera à la lecture d'ouvrages plus importants ou plus spécialisés.

LES AUTEURS.

I. — Constitution de la matière

Le courant électrique est un déplacement d'électrons.

I. — MOLÉCULES

La matière est constituée de particules extrêmement petites : les *molécules.* Les molécules d'un corps pur sont identiques ; celles d'un mélange sont de différentes espèces.

a. Les molécules ne se touchent pas.

Dans les gaz, les molécules sont très éloignées. Dans l'hydrogène à 0°, sous la pression de 76 cm de mercure, leur distance moyenne est, environ, 700 fois leur plus grande dimension.

Dans les liquides, elles sont plus rapprochées ; elles le sont encore davantage dans les solides ; cependant, ces corps ne sont pas compacts comme ils le paraissent. Ceci explique la compressibilité différente des solides, des liquides et des gaz.

b. Les molécules s'attirent.

Cette force d'attraction réciproque diminue rapidement quand leur distance augmente ; ceci explique la rigidité des solides, la viscosité des liquides et la mobilité des gaz.

c. Les molécules sont en perpétuelle agitation.

Il est possible de déceler ces mouvements désordonnés dans les gaz et dans les liquides. A l'aide d'un puissant microscope, on distingue les grains de fumée dans un gaz, ou les grains d'encre de Chine disséminés dans l'eau, agités d'un perpétuel fourmillement.

Dans les solides, l'agitation moléculaire, difficile à observer, est prouvée par ses conséquences.

d. L'agitation moléculaire croît avec la température.

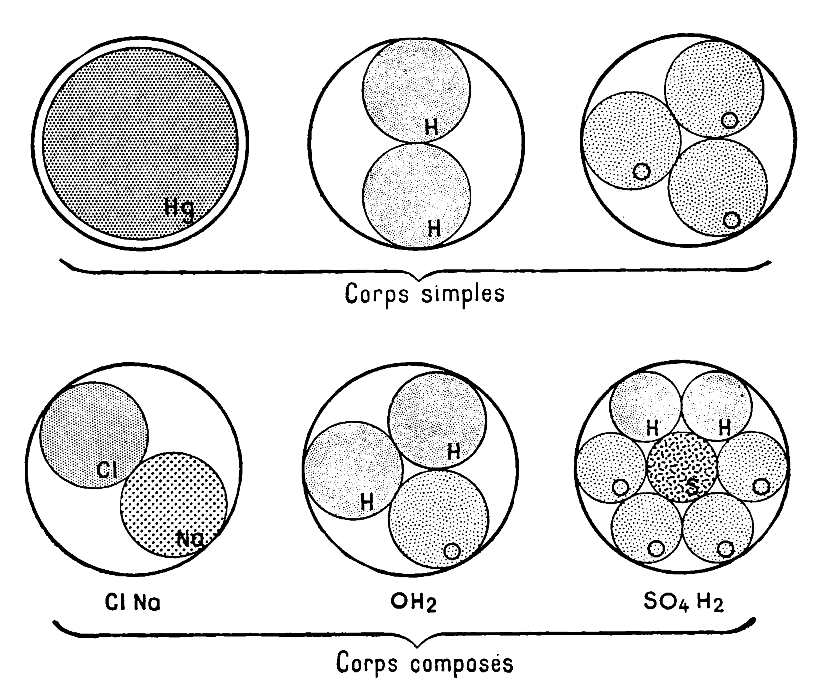
Chauffer un corps, c'est accroître la vitesse moyenne de ses molécules ; le refroidir, c'est diminuer cette vitesse.

De nombreuses théories s'accordent pour situer le repos moléculaire total à une température qui correspond à — 273,15° C.

2. — ATOMES

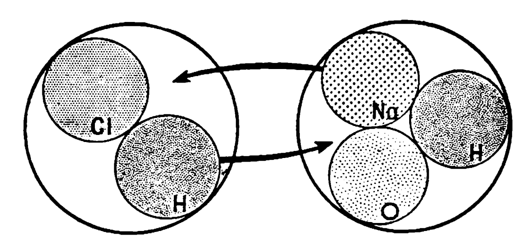
Les molécules sont des assemblages de systèmes plus petits : les *atomes.*

Les molécules d'un corps simple contiennent un ou plusieurs atomes identiques ; celles d'un corps composé contiennent plusieurs atomes qui ne sont pas tous semblables.



Les réactions chimiques s'expliquent par l'échange ou le passage d'atomes d'une molécule à l'autre.

Exemple.



Acide chlorhydrique + soude → chlorure de sodium + eau

$HCl + NaOH \rightarrow NaCl + H_2O$

On connaît, actuellement, plus de 200 000 corps composés ; leurs molécules sont des arrangements d'une centaine d'atomes environ.

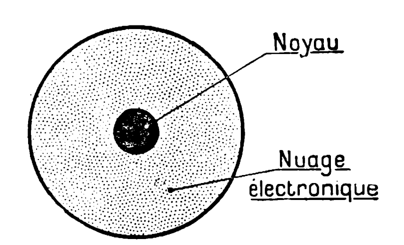
La *molécule gramme* d'un corps quelconque est la masse qui contient $N = 6 \times 10^{23}$ molécules (par exemple : 32 g d'oxygène, 18 g d'eau).

Par analogie, l'*atome gramme* est la masse qui contient 6×10^{23} atomes (six suivi de 23 zéros).

Les masses des molécules et des atomes sont tellement faibles qu'elles échappent à toute pesée.

3. — CONSTITUTION DE L'ATOME

L'atome comporte une partie centrale, compacte, le *noyau* pesant, entourée d'un *nuage électronique* de masse infime (1/1 000 environ de celle du noyau).



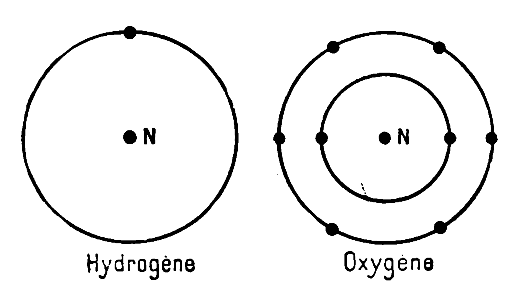
Le diamètre du noyau est de l'ordre du cent milliardième de millimètre.

Le nuage électronique comprend un ou plusieurs *électrons* qui évoluent très rapidement.

4. — ÉLECTRONS

Il est commode de considérer les électrons comme des grains identiques d'*électricité négative*.

On les représente évoluant, sur des orbites circulaires, autour du noyau.



Pour un noyau de 1 mm de diamètre, l'électron le plus proche serait à plusieurs mètres de lui.

Nous admettrons, en première approximation, que l'atome comprend :

— ***le noyau, chargé d'électricité positive,***

— ***les électrons, grains d'électricité négative.***

De très nombreuses expériences ont montré que :

a. *deux éléments de même espèce électrique se repoussent ;*
deux éléments d'espèces électriques contraires s'attirent.

L'attraction par le noyau retient les électrons dans son voisinage. Les électrons éloignés sont, de beaucoup, les moins attirés.

b. La charge totale des électrons équilibre celle du noyau; au total, l'atome est neutre. Mais des électrons lointains peuvent s'échapper ; la neutralité électrique de l'atome est rompue : il devient un ***ion***.

Lorsqu'un électron passe d'un corps neutre A sur un corps neutre B, A, *perdant un électron, est chargé positivement* et B, *gagnant un électron, est chargé négativement.*

Les masses de A et B sont, pratiquement, inchangées.

5. — CONCLUSION

L'électricité positive est solidaire du noyau, donc de la masse du corps, qui reste pratiquement constante.

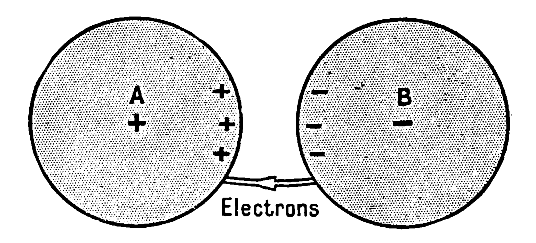
a. **Électriser un corps, c'est lui donner, ou lui retirer, des électrons, c'est-à-dire de l'électricité négative.**

Quand deux corps sont frottés l'un contre l'autre (ébonite et drap par exemple), ils s'électrisent en sens inverse : des électrons de l'un (drap) sont passés sur l'autre (ébonite).

Après contact prolongé, ces corps redeviennent tous deux neutres : les électrons acquis par le corps chargé négativement (ébonite) sont revenus sur le corps chargé positivement (drap).

b. **Courant électrique.**

En réunissant par un fil métallique un corps métallique B chargé négativement, où les électrons sont en surnombre, « en pression », à un corps métallique A, chargé positivement, où les électrons sont raréfiés, « en dépression », des électrons cheminent de B vers A.



On dit que le fil est parcouru par un ***courant électrique.***

Le courant électrique est un déplacement d'électrons.



2. — Transformation de l'énergie. Conservation. Mesure

I. — NOTION D'ÉNERGIE

I. — ÉNERGIE

Tout corps (ou système de corps) qui, en se modifiant lui-même, impose des modifications à un autre corps (ou à un autre système de corps), lui cède de l'énergie.

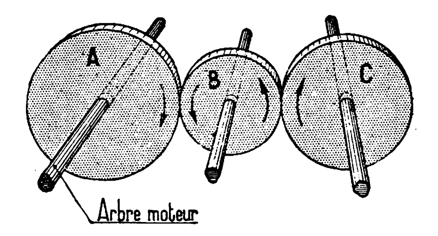
a. Le mot modification est pris dans un sens très général : changement de température, de forme, de position, de vitesse et même de structure.

Exemples.

Un ressort d'horloge, bandé, se détend peu à peu et met en mouvement les différentes parties du mécanisme. Il fournit de l'énergie aux rouages.

La combustion du charbon (combinaison avec l'oxygène) est une modification du système « carbone + oxygène » ; elle produit de la chaleur et peut, par exemple, vaporiser l'eau d'une chaudière. L'eau a reçu de l'énergie. La vapeur, en se détendant, fournit de l'énergie au piston, aux roues...

b. Un corps peut, en même temps, recevoir de l'énergie et en fournir.



Exemples.

Un engrenage intermédiaire dans un mécanisme, une courroie réunissant deux poulies.

La roue intermédiaire B reçoit de l'énergie de la roue motrice A et en transmet à la roue C menée par B

2 — FORMES DE L'ÉNERGIE

Un corps (ou un système de corps) peut posséder de l'énergie pour diverses raisons.

Un morceau de charbon incandescent tombe dans l'air sous l'action de la pesanteur ; il possède de l'énergie :

a. il est élevé au-dessus du sol ;

b. il est animé d'une certaine vitesse ;

c. en brûlant dans l'air qui l'environne, il fournit de la chaleur ;

d. il émet de la lumière, et, en éclairant les objets avoisinants, il en modifie l'aspect.

On ne connaît pas toutes les formes de l'énergie, mais la physique moderne affirme que, si l'on pouvait utiliser toute celle contenue dans 1 g de matière quelconque, on pourrait alimenter pendant cinquante-sept mille ans une lampe à incandescence de 50 « watts ».

3 — ÉNERGIE POTENTIELLE. ÉNERGIE CINÉTIQUE

L'énergie due à la position, à la forme, ou à la structure intérieure est appelée *énergie potentielle.*

Exemples.

Une masse placée au-dessus du sol, un ressort tendu, un morceau de charbon et l'air qui l'environne contiennent de l'***énergie potentielle***.

L'énergie due au mouvement est appelée *énergie cinétique.*

Exemples.

L'eau d'une cascade, un véhicule en marche, un projectile possèdent de l'***énergie cinétique***.

Les molécules d'un corps, toujours agitées, possèdent de l'***énergie cinétique***.

La chaleur est une forme particulière de l'énergie cinétique appelée énergie thermique.

4. — TRANSFORMATIONS DE L'ÉNERGIE

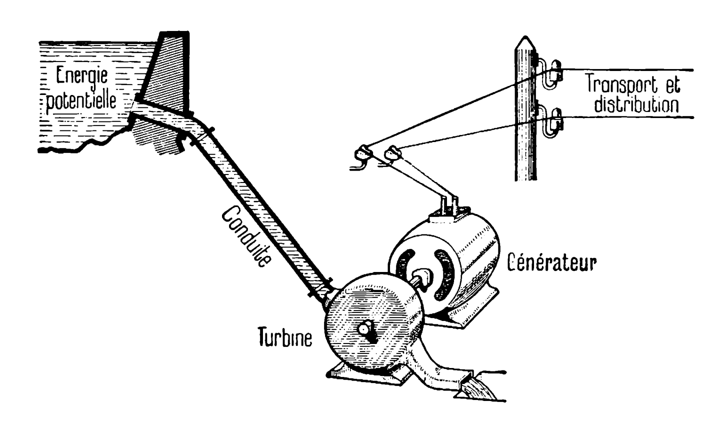
Dans son passage d'un système à un autre, l'énergie peut subir diverses transformations.

Exemple.

L'eau d'un lac de montagne possède, par rapport à la vallée, de l'énergie potentielle.

On canalise cette eau dans une conduite pour lui faire actionner une turbine en bas de la vallée. En arrivant à la turbine, l'eau est sous pression, c'est-à-dire *possède de l'énergie potentielle* : elle est animée d'une vitesse, c'est-à-dire *possède de l'énergie cinétique.*

L'eau cède à la turbine une partie de son énergie, la turbine en transmet la plus grande partie à un générateur électrique ; celui-ci la transforme presque intégralement en énergie électrique.



L'énergie distribuée par une canalisation électrique permet d'obtenir facilement :

— de l'énergie ***mécanique*** (moteurs électriques) ;
— de l'énergie ***thermique*** (bouilloires, fours électriques);
— de l'énergie ***chimique*** (charge d'un accumulateur) ;
— de l'énergie ***lumineuse*** (lampes à incandescence, tubes luminescents);
— de l'énergie ***rayonnante*** (radiocommunications, rayons X).

Dans les transformations que les hommes savent réaliser, une partie de l'énergie se transforme toujours en chaleur.

II. — PRINCIPE DE LA CONSERVATION DE L'ÉNERGIE

I. — PRINCIPE

Un très grand nombre d'expériences précises ont montré que l'***énergie est indestructible.*** Nous ne pouvons ni en produire, ni en détruire; nous pouvons seulement la transporter d'un corps ou d'un système de corps à un autre.

Un système isolé, c'est-à-dire qui ne réalise aucun échange d'énergie avec le milieu extérieur, *possède une énergie constante.*

2. — ÉNERGIE UTILE. RENDEMENT

En général, une machine ne restitue pas, sous forme utilisable, toute l'énergie qu'elle absorbe.

Exemples.

Un moteur électrique est construit pour fournir de l'énergie mécanique ; pendant le fonctionnement, il s'échauffe, vibre et fait vibrer son support. Il dissipe, en particulier, en chaleur, une partie de l'énergie qu'il reçoit.

Par contre, un radiateur est construit pour fournir de la chaleur, et la transformation de l'énergie est totale.

Désignons par W_t l'*énergie totale* fournie au moteur pendant un certain temps, par W_u l'*énergie mécanique utile* qu'il produit, et par W_p l'*énergie qu'il dissipe,* le principe de la conservation de l'énergie conduit à écrire :

$$W_t = W_u + W_p$$

Si le fonctionnement du moteur est régulier, on appelle ***rendement*** du moteur et on désigne par η (se lit *êta*) ***le rapport de l'énergie utile recueillie à l'énergie totale fournie***

$$\boxed{\eta = \frac{W_u}{W_t}}$$

Le rendement des machines est toujours inférieur à ***1.***

Un faible rendement manifeste un gaspillage d'énergie.

Le rendement s'exprime souvent en centièmes.

Exemples.

Le rendement d'une locomotive à vapeur peut atteindre 20 %, celui d'un moteur à combustion 30 %, celui des machines électriques 95 %.

Le rendement d'un radiateur est 100 %.

III. — MESURE DE L'ÉNERGIE

I. — ÉNERGIE MÉCANIQUE

Lorsqu'une force constante déplace son point d'application dans sa propre direction, elle effectue un ***travail*** qui, par définition, a pour mesure le ***produit de la force par le déplacement :***

$$A = F \times l$$

Lorsqu'une force verticale élève une masse au-dessus du sol, elle effectue un travail. Le système moteur donne de l'énergie à la masse élevée.

On mesure le travail et l'énergie avec la même unité, et, si W représente l'énergie, on a aussi

$$\mathbf{W} = \mathbf{F} \times \boldsymbol{l}$$

2. — UNITÉS DE TRAVAIL ET D'ÉNERGIE

L'unité de travail et d'énergie dépend du système d'unités employé (voir tableau page 15).

Nous utiliserons le joule (1) **(1 J).**

C'est, par exemple, l'énergie potentielle, par rapport au sol, d'une masse de 1 kg, située à $\frac{1 \text{ m}}{9{,}81} = 0{,}102$ m au-dessus du sol à Paris.

Une quantité d'énergie, quelle que soit sa forme, peut s'exprimer en joules.

3. — ÉNERGIE THERMIQUE

L'énergie nécessaire pour élever la température d'un corps, sans changement d'état physique, est proportionnelle à la masse de ce corps et à la variation de température.

Exemple.

Pour élever de 1° C la température de 1 kg d'eau, il faut, approximativement, une énergie thermique de 4 180 J.

4 180 J, par kilogramme et par degré, est la valeur de la chaleur spécifique de l'eau.

Pour un corps de masse *m*, de chaleur spécifique moyenne *c*, une variation de température θ (*thêta*) nécessite l'énergie

$$\mathbf{W} = m \,.\, c \,.\, \theta$$

Les physiciens emploient d'autres unités d'énergie thermique :

— ***la microthermie*** (1 µth), appelée aussi calorie, vaut 4,18 J ;
  1 J vaut donc $\frac{1}{4{,}18} = 0{,}239$, soit environ 0,24 µth;

— ***la millithermie*** (1 mth), appelée aussi kilocalorie, vaut 1 000 µth, c'est-à-dire 4 180 J ;

— ***la thermie*** (1 th) vaut 10^6 µth.

(1) Joule : physicien anglais (1818-1889).

L'énergie thermique est la forme la moins facilement transformable.

(L'agitation désordonnée des molécules se prête mal à l'utilisation de leur énergie cinétique.)

Un moteur thermique a toujours un mauvais rendement.

D'autre part, au cours des transformations de l'énergie, il apparaît toujours de la chaleur, en pure perte (frottements mécaniques, échauffement des conducteurs électriques).

On dit souvent que la chaleur est une forme dégradée de l'énergie.

IV. — INTÉRÊT DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Pour utiliser l'énergie, les hommes ont dû résoudre deux séries de problèmes :

ses transformations économiques,

son transport économique.

L'énergie électrique apporte, le plus souvent, les meilleures solutions à ces problèmes, pour diverses raisons :

- son transport est économique (peu de pertes en ligne) ;
- toute machine électrique a un très bon rendement ;
- elle permet seule d'utiliser certains phénomènes (radiocommunications, rayons X).

Pour ces raisons, les applications de l'énergie électrique envahissent irrésistiblement toutes les branches de l'activité humaine.



3. — Unités mécaniques utilisées en électricité

1. — FORCE, ACCÉLÉRATION, MASSE D'UN CORPS

Toute ***force*** F, s'exerçant sur un solide libre, l'entraîne d'un mouvement uniformément accéléré.

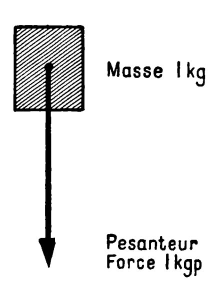
L'accélération, augmentation de vitesse par seconde, est désignée généralement par γ (*gamma*).

La relation $\frac{F}{\gamma} = m$ définit la **masse** m d'un corps.

Pour un corps (pour une masse donnée de matière), l'effet, accélération γ est proportionnel à la cause, force F $\left(\gamma = \frac{F}{m}\right)$.

2. — POIDS D'UN CORPS

Le poids* P** d'un corps est la ***force d'attraction que la terre exerce sur lui. Cette force agissant seule, sur le corps complètement libre de se mouvoir, lui communiquerait une accélération : on la désigne, dans ce cas, par g.

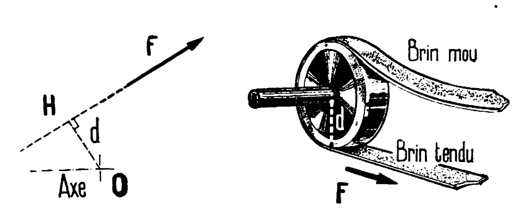


A Paris, cette accélération vaut $g = 9{,}81\ m/s^2$.

$$\mathbf{P} = mg$$

3. — MOMENT D'UNE FORCE OU D'UN COUPLE PAR RAPPORT A UN AXE

L'action d'une force sur un corps mobile autour d'un axe dépend à la fois de l'intensité de la force et de sa position par rapport à l'axe.



Par définition, lorsque la force F est dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation, le moment de la force par rapport à l'axe a pour mesure

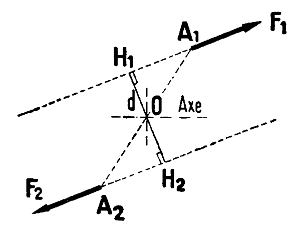
$$\mathbf{M} = \mathbf{F} \times d$$

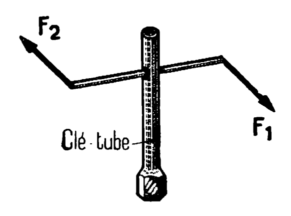
d étant la distance de la droite d'action de la force à l'axe.

Pour un couple, ensemble de deux forces égales, parallèles, de sens opposés,

$$\mathbf{M} = \mathbf{F} \times d$$

d étant la distance des droites d'action des deux forces.

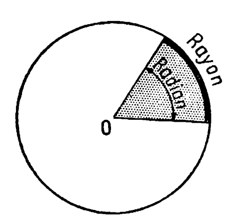




4. — TRAVAIL

a. Une force F déplaçant son point d'application d'une longueur l produit le ***travail*** $W = F \times l$, si la force et le déplacement ont même direction.
Dans le cas général où la force F et le déplacement l forment l'angle α (*alpha*), le travail s'exprime par $W = F \times l \times \cos \alpha$.

b. **Dans le mouvement de rotation**, le travail s'exprime par $W = M \times \alpha$



M moment de la force ou du couple,
α mesure de l'angle en radians décrit autour de l'axe.

(***1 radian*** est l'angle au centre qui intercepte sur la circonférence un arc égal au rayon, $360^{\circ} = 2\,\pi$ radians.)

5. — PUISSANCE

La puissance a pour mesure le travail accompli dans l'unité de temps

$$\mathbf{P} = \frac{\mathbf{W}}{t}$$

Dans le mouvement de rotation, de vitesse angulaire constante ω (*oméga*) évaluée en radians par seconde, l'expression de la puissance est :

$$P = \frac{W}{t}, \quad \text{soit } \frac{M\alpha}{t}, \quad \text{c'est-à-dire } \mathbf{P} = \mathbf{M} \times \omega$$

6. — SYSTÈMES D'UNITÉS

Les grandeurs intervenant dans les relations mécaniques ou physiques doivent être mesurées avec des unités convenablement choisies.

Ainsi, considérons $F = m\gamma$; cette relation implique que la force unité, agissant sur la masse unité, lui communique l'unité d'accélération.

Divers systèmes d'unités ont été établis.

Dans toute relation, les grandeurs doivent être mesurées avec les unités d'un même système.

Nous donnons dans le tableau suivant les unités mécaniques essentielles utilisées dans ce cours.

	La MASSE acquiert	l'ACCÉLÉRATION due à	la FORCE qui, pour	le DÉPLACEMENT,	le TRAVAIL. produit	PUISSANCE, mesure du travail par seconde.
Symboles.	m	γ	F	l	W	P
Système C. G. S. (physiciens).	1 g	1 cm/s²	1 dyne	1 cm	1 erg	1 erg/s
Système M. K. S. (électriciens).	**1 kg**	**1 m/s²**	(1) **1 newton (1 N)**	**1 m**	**1 joule (1 J)**	(2) **1 watt (1 W)**
Système M. Kp. S. (mécaniciens) (à titre transitoire).	masse qui pèse 9,81 kg force	1 m/s²	1 kg force ou 1 kgp (poids d'une masse de 1 kg)	1 m	1 kgm	1 kgm/s multiple 1 ch = 75 kgm/s

Remarques.

a. Dans chaque système, l'***unité de moment*** sera désignée par le produit :

unité de longueur × unité de force,

soit :

dans le système C. G. S. : 1 cm × 1 dyne = 1 cm . dyne
dans le système M. K. S. : 1 m × 1 N = 1 m . N
dans le système M. Kp. S. : 1 m × 1 kgp = 1 m . kgp

(1) Newton : mathématicien et physicien anglais (1642-1727).
(2) Watt : mécanicien écossais (1736-1819).

b. Énergie cinétique.

Comme toute forme d'énergie, elle peut se mesurer en joules, en ergs ou en kilogrammètres; son expression est :

— pour un mouvement de translation $W = \frac{1}{2} mv^2$ (m masse du corps en mouvement, v sa vitesse),

— pour un mouvement de rotation $W = \frac{1}{2} I\omega^2$ (I moment d'inertie du corps par rapport à l'axe, ω vitesse angulaire).

c. Correspondances des unités.

Force :	1 kgp	= 9,81 N = 981 000 dynes
	1 N	= 10^5 dynes
Travail	1 kgm	= 9,81 J = 98 100 000 ergs
	1 J	= 10^7 ergs
Puissance :	1 kgm/s	= 9,81 W
	1 W	= 10^7 ergs/s
	1 ch	= 75 × 9,81 = 736 W

EXERCICES

1 — Une chute d'eau débite 90 m³ par minute et présente une dénivellation utile de 20 m. Elle entraîne une turbine de rendement 60 *W*. Cette turbine actionne une génératrice électrique de rendement 85 %.
Calculer : la puissance théorique de la chute en kgm/s, la puissance mécanique de la turbine en ch, la puissance électrique de la génératrice en kW.

Réponses : 30 000 kgm/s ; 240 ch ; 150 kW.

2 — Évaluer en newtons le poids d'une masse de 5 tonnes ($g = 9,81$ m/s²). Un monte-charge, dont le rendement est 0,7, élève en 20 secondes cette charge à une hauteur de 4 m ; calculer la puissance moyenne du moteur d'entraînement.

Réponses : 49 050 N ; 14 kW.

3 — Une transmission par courroie relie un moteur de puissance utile 2,7 kW à une machine dont la poulie d'entraînement tourne à la vitesse de 1 200 tours par minute. Le rendement de cette transmission est 0,9.
Calculer le moment du couple d'entraînement.

Réponse : 19,3 m.N.

4 — Une lampe électrique de 50 W est plongée dans un calorimètre (de masse en eau négligeable) contenant 1 litre d'eau.
Calculer la chaleur dégagée par la lampe en 5 minutes et l'élévation de température de l'eau pendant ce temps.

Réponses : 3 600 µth ; 3,6° C.

5 — La combustion de 1 m³ de gaz de ville dégage, théoriquement, 4 thermies pour une dépense de 35 F. Cette consommation est prévue pour 1 heure avec un radiateur dont le rendement est 0,6.
Calculer la puissance de chauffe dont on dispose.
Quelle dépense horaire occasionnerait un radiateur électrique de même puissance (rendement 1), l'énergie électrique coûtant 20 F le kilowattheure ? (1 kWh = énergie fournie par 1 kW pendant 1 heure.)

Réponses : 2 800 W environ ; 56 F.

6 — Calculer la force de traction et la puissance du treuil qui tire, à la vitesse constante de 9 km/h, sur une rampe montante de pente 4 %, un wagon de 30 tonnes pour lequel les résistances au roulement sont de 3 % de la charge.

Réponses : 20 600 N ; 51,5 kW.

7 — Le moteur qui actionne une grue a une puissance, supposée constante, de 20 kW ; sachant que le rendement des organes mécaniques de l'appareil de levage est 0,75, calculer le temps nécessaire pour élever de 6 m une charge de 2,5 tonnes.

Réponse : 10 secondes environ.

8 — Un moteur de puissance 3 kW actionne une pompe destinée à refouler de l'eau dans un large réservoir. Quel volume d'eau est élevé dans ce réservoir en 10 minutes, lorsque la différence des niveaux dans le réservoir et le puits d'alimentation est de 20 m ? On admettra que les divers frottements absorbent les $\frac{2}{5}$ de l'énergie mise en jeu.

Réponse : 5,5 m³.

9 — 1° Exprimer en joules l'énergie cinétique :

a. d'un projectile de 15 g lancé à la vitesse de 800 m/s ;

b. d'un véhicule de 5 000 kg animé d'une vitesse de 36 km/h ;

c. d'un volant de masse $m = 300$ kg et de rayon $R = 0,4$ m., tournant à la vitesse de 1 800 tours par minute (ce volant est assimilé à un disque homogène de même rayon R, dans ce cas son moment d'inertie est $I = \frac{m R^2}{2}$).

2° En supposant ces énergies cinétiques totalement utilisées, à quelle hauteur pourraient-elles élever, dans chaque cas, une masse de 100 kg ?

Réponses : 4 800 J ; 250 000 J ; 864 000 J.

Environ : 4,9 m ; 255 m ; 880 m.

10 — Un moteur électrique communique à un véhicule de 2 tonnes une accélération de 0,25 m/s² sur une route horizontale.

1° Calculer la force de traction équivalente à l'action de ce moteur :

a. en négligeant les divers frottements ;

b. en assimilant les frottements à une force résistante égale à 2 % du poids du véhicule.

2° Calculer dans ces deux cas la puissance utile du moteur quand la vitesse du véhicule est de 18 km/h.

Réponses : 500 N ; 892 N ; 2,5 kW ; 4,46 kW.

✧

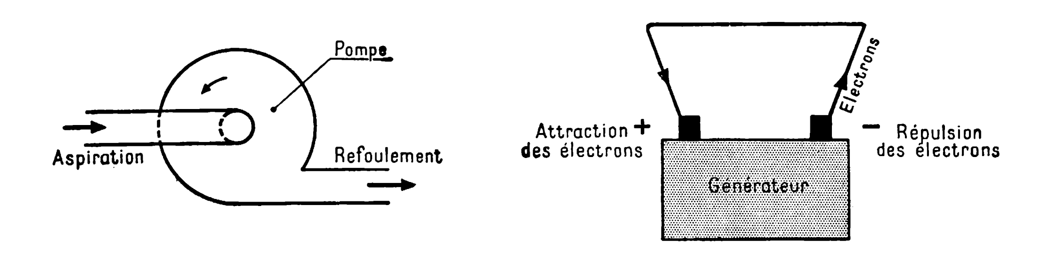
4. — Nature et manifestations du courant

I. — COURANT ÉLECTRIQUE

1.— GÉNÉRATEUR

Le *courant électrique est un déplacement d'électrons* ; tout système susceptible de créer ce mouvement constitue une *source de courant* : ***c'est un générateur.***

De même qu'une pompe utilise de l'énergie mécanique pour mettre un fluide en circulation, un générateur, animant les électrons, transforme l'énergie qu'il reçoit, ou qu'il possède, en énergie électrique.



Les deux bornes du générateur sont comparables aux deux orifices de la pompe. Ces bornes se distinguent par des signes conventionnels + et — :

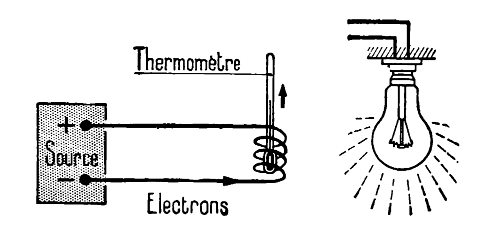
à la borne positive + aspiration des électrons ;
à la borne négative — refoulement des électrons.

Les *piles et accumulateurs* utilisent l'énergie sous forme chimique ; les *générateurs tournants* (la dynamo par exemple) utilisent l'énergie mécanique pour produire du courant.

a. Effet thermique.

Le fil métallique, qui relie les deux bornes de la source, s'échauffe et dégage de la chaleur dans le milieu ambiant.

Cet effet est utilisé pour l'éclairage par lampes à incandescence ; le filament de tungstène de la lampe est porté à haute température par le passage du courant.

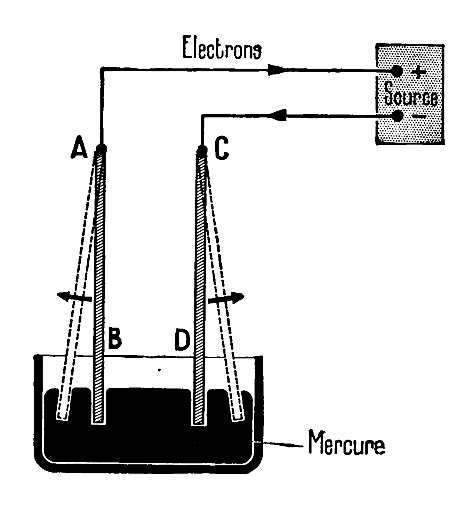


b. Effet mécanique.

Un courant peut déformer son propre circuit. Réalisons un circuit métallique déformable, il présente deux éléments rigides AB et CD, suspendus, parallèles, assez rapprochés (environ 1 cm), trempant dans une cuve à mercure.

Au moment où nous relions A et C aux bornes de la source (une batterie d'accumulateurs), les deux éléments mobiles se repoussent.

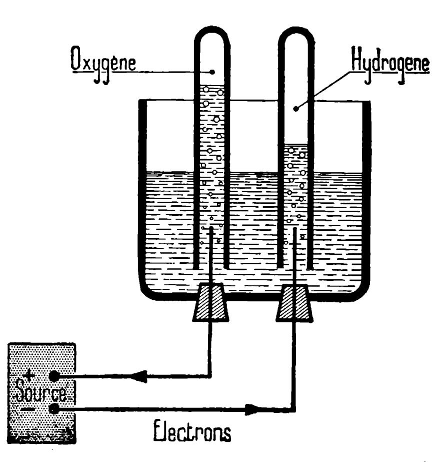
Cette force exercée sur AB et CD est appelée *force électrodynamique.*

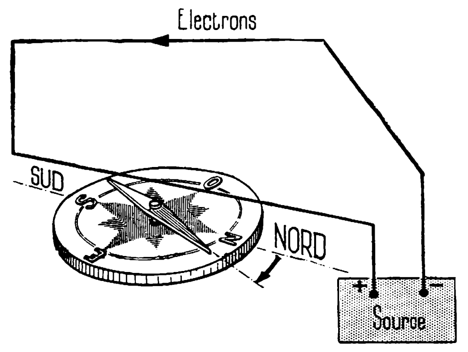


c. Effet chimique.

Relions deux fils de fer aux deux bornes d'une source ; introduisons les deux extrémités libres de ces fils dans une solution étendue de soude.

Nous voyons apparaître des bulles gazeuses le long des extrémités immergées. Nous pouvons recueillir séparément de l'oxygène à l'une et de l'hydrogène à l'autre.





d. **Effet magnétique.**

Disposons un fil métallique, au voisinage d'une boussole, parallèlement à la position d'équilibre de l'aiguille aimantée.

Dès que les extrémités du fil sont reliées à la source, l'aiguille de la boussole dévie de sa position initiale.

Conséquence.

L'étude qualitative et quantitative de ces phénomènes perceptibles et mesurables nous permettra d'établir les propriétés du courant électrique, et les lois qui les régissent.

II. — CIRCUIT ÉLECTRIQUE

1. — CONDUCTEURS. ISOLANTS

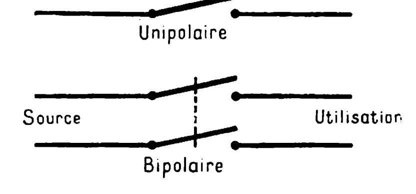
Les phénomènes que nous venons de décrire se reproduisent chaque fois que nous utilisons des fils métalliques, en fer, en cuivre, en nickel, ou en argent...

Les métaux sont des conducteurs; la solution de soude est aussi un conducteur ; il en est encore de même pour les solutions aqueuses d'acides et de sels métalliques. Enfin, à l'état fondu, ces corps sont aussi des conducteurs.

Ces manifestations n'apparaissent pas si nous utilisons des tiges de verre. de bois sec, de porcelaine, ou d'ébonite ; de tels corps sont dits *isolants.*
L'air est isolant.

Cette distinction n'a rien d'absolu; les isolants sont, en réalité, de très mauvais conducteurs ; les métaux sont plus ou moins bons conducteurs (leçon 9).

2. — CIRCUIT



Si la chaîne des conducteurs est continue d'une borne à l'autre du générateur, on dit que le *circuit est fermé*, *le courant s'établit.*

Une interruption dans la chaîne des conducteurs, ou *ouverture du circuit*, *arrête le passage du courant.*

L'appareil utilisé pour ouvrir ou fermer le circuit est un **interrupteur**. Très souvent, l'air constitue l'isolant assurant la coupure.

3. — SENS DU COURANT ÉLECTRIQUE

Le générateur refoule des électrons à sa borne — (négative) et les aspire à sa borne + (positive) : le sens du courant est défini par cette double action.

A l'extérieur du générateur, les électrons circulent de la borne négative à la borne positive.

On utilise couramment un ***sens conventionnel opposé*** (on pourra dire dans ce cas que les électrons cheminent à l'envers du sens conventionnel). Pour éviter toute confusion dans la suite, on précisera s'il s'agit du sens conventionnel ou du sens de circulation des électrons.

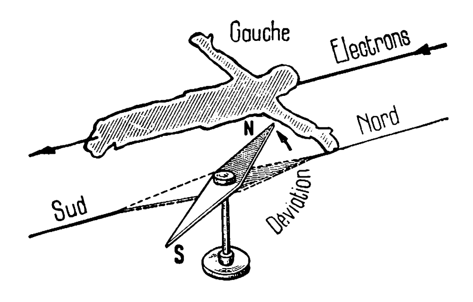
Reportons-nous aux précédents montages et intervertissons les contacts des fils conducteurs aux bornes du générateur, nous constatons que les phénomènes décrits se reproduisent, mais avec changement du sens de la déviation de la boussole (page 19), et inversion des zones où l'oxygène et l'hydrogène se dégageaient dans la solution de soude (page 18).

Ces deux phénomènes, dits polarisés, permettent de repérer le sens du courant.

L'inversion des connexions aux bornes de la source, dans le cas des autres montages, ne modifie pas les phénomènes observés, ces phénomènes sont dits *non polarisés.*

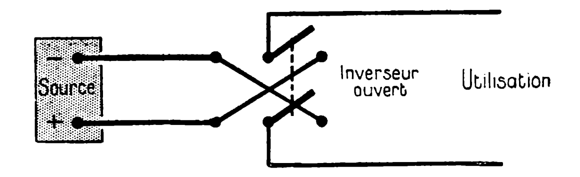
Dans la pratique, pour reconnaître le sens du courant dans un conducteur, on utilise la **règle de l'observateur d'Ampère** (1) :

On imagine un observateur, couché le long du fil conducteur et regardant une aiguille aimantée placée au voisinage. Si, au moment de l'établissement du courant, l'observateur voit le pôle nord de l'aiguille dévier vers sa gauche, on en conclut que les électrons suivent le fil dans le sens de la tête vers les pieds de l'observateur.



La conclusion serait inverse si la déviation du pôle nord de l'aiguille se faisait vers la droite de cet observateur.

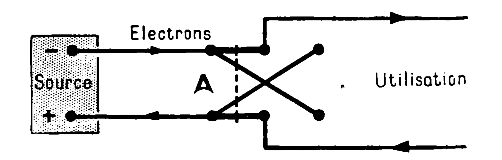
(1) Ampère : physicien français (1775-1836).

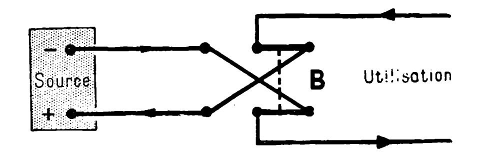


Remarque.

L'inversion des contacts aux bornes de la source est facilitée et rendue rapide par un *inverseur*.

Les deux positions A et B des deux couteaux, solidairement mobiles, établissent le courant dans le circuit d'utilisation, dans un sens ou dans l'autre.





4. — VITESSE DU COURANT

a. Vitesse des électrons dans les conducteurs.

Les électrons se repoussent entre eux (charges de même nom), mais, refoulés par la borne — et attirés par la borne + de la source, l'ensemble des électrons en déplacement dans un conducteur obéit à la poussée générale.

Un électron saute d'un atome à un autre en traversant l'espace, relativement grand, qui les sépare.

La vitesse maximum des électrons dans les conducteurs est toujours inférieure à 1 m/s ; elle dépend de la poussée produite par le générateur et du conducteur lui-même

b. Vitesse de propagation du courant dans les lignes.

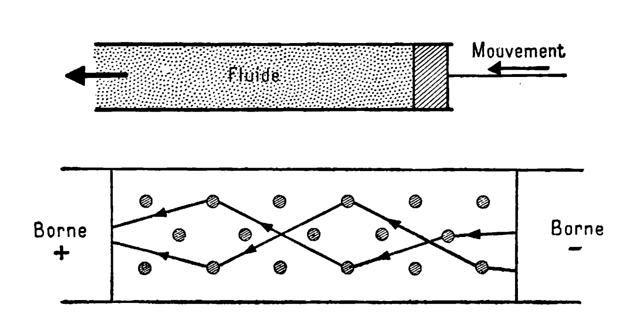
Cette vitesse est très grande, de l'ordre de 200 000 km/s dans les conducteurs métalliques.

On sait que les communications téléphoniques s'effectuent presque instantanément.

Ceci n'est pas en contradiction avec la faible vitesse de déplacement des électrons : un mouvement lent peut se propager très rapidement.

Exemple.

En poussant lentement un piston qui refoule de l'eau à l'entrée d'un tube plein, toute l'eau du tube se déplace presque immédiatement d'un bout à l'autre du conduit. Ainsi, des électrons sont mis, presque simultanément, en mouvement tout le long du circuit.

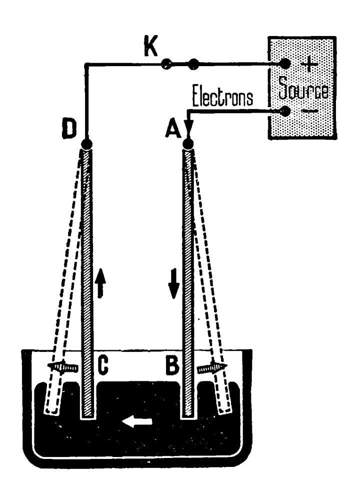


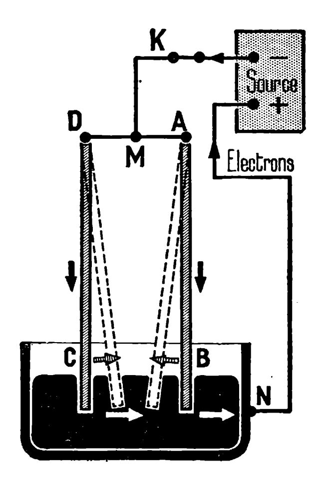
5. — Courant — Ampère. Quantité d'électricité — Coulomb

I. — INTENSITÉ DU COURANT ÉLECTRIQUE

I. — FORCE ÉLECTRODYNAMIQUE ET COURANT

La répulsion de deux conducteurs parallèles parcourus par un courant électrique peut être utilisée pour caractériser ce courant.





D'une manière générale, nous pouvons constater expérimentalement que deux conducteurs mobiles, initialement parallèles :

a. se repoussent si ces courants sont de sens contraires ;

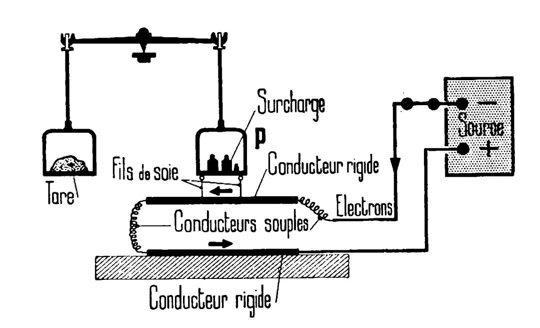
b. s'attirent si ces courants sont de même sens.

La force électrodynamique qui s'exerce sur deux conducteurs parallèles dépend de conditions géométriques : les longueurs de ces conducteurs, leur distance, ***et du milieu :*** air, eau...

(L'étude plus précise du phénomène sera faite à la leçon 26.)

Dans un milieu donné, pour des conditions géométriques données, ***cette force électrodynamique dépend des facteurs électriques, c'est-à-dire des courants eux-mêmes.***

Le dispositif expérimental ci-contre permet de le vérifier.

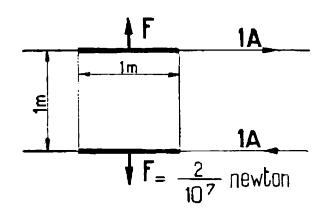


En alimentant le circuit à l'aide de générateurs différents, il faut placer sur le plateau P des surcharges différentes pour maintenir ce plateau à sa position initiale, c'est-à-dire en équilibre avec la tare constante placée sur l'autre plateau.

Ce phénomène nous amène à considérer une nouvelle grandeur : ***l'intensité ou valeur d'un courant,*** on la désigne par I ou *i*.

2. — UNITÉ DE COURANT : L'AMPÈRE (1 A)

La définition légale de l'unité de courant utilise la force électrodynamique s'exerçant dans des conditions déterminées. Loi du 14 janvier 1948 :



L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable, et placés à 1 m l'un de l'autre, dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à 2×10^{-7} newton, par mètre de longueur.

Multiple	le *kiloampère*,	1 kA = 1 000 A
Sous-multiples :	le *milliampère*,	1 mA = 10^{-3} A
	le *microampère*,	1 µA = 10^{-6} A

II. — QUANTITÉ D'ÉLECTRICITÉ

1. — DÉFINITION

Le courant est un débit d'électricité : il transporte, par unité de temps, une quantité d'électricité fonction de sa valeur I.

Par définition : ***un courant I constant transporte, pendant un intervalle de temps t, la quantité d'électricité***

$$\boxed{Q = It}$$

(Ces grandeurs sont mesurées avec des unités convenables.)

2. — UNITÉ : LE COULOMB [1] (1 C)

Le coulomb est la quantité d'électricité transportée par un courant constant de 1 ampère pendant 1 seconde.

La relation précédente s'écrit Q coulombs = I ampères × t secondes.

Interprétation.

Nous avons défini (leçon 1) la quantité d'électricité élémentaire : l'électron.

Cette quantité est une unité trop petite pour l'usage courant ; le coulomb vaut environ 6×10^{18} électrons.

3. — UNITÉ PRATIQUE : L'AMPÈRE-HEURE (1 Ah)

C'est la quantité d'électricité transportée par un courant constant de 1 ampère pendant 1 heure.

Par suite : ***1 ampère-heure = 3 600 coulombs.***

La capacité d'une batterie d'accumulateurs est évaluée en ampères-heures. L'expression 30 Ah, par exemple, désigne la quantité d'électricité transportée :

soit par un courant constant de 3 A pendant 10 h,
soit — — — 1 A — 30 h,
soit — — — 2 A — 15 h.

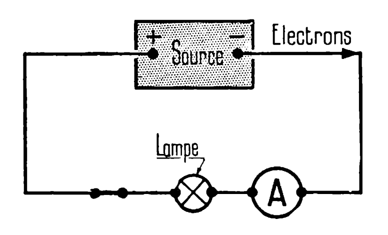
Relation pratique : **Q *ampères-heures* = I *ampères* × *t heures*.**

---

(1) Coulomb : physicien français (1736-1806).

Remarque.

La force électrodynamique s'exerçant entre deux conducteurs parallèles peut prendre des valeurs importantes, par exemple pour des barres de distribution parcourues, dans les centrales et les usines d'électrométallurgie, par des courants de plusieurs milliers d'ampères.



Pour des courants d'usage habituel, quelques ampères (laboratoires et moyennes installations), cette force électrodynamique est très faible. Elle n'est pas utilisable pour les mesures pratiques.

La mesure d'un courant I se fait à l'aide d'un ***ampèremètre***.

Cet appareil se monte en série dans le circuit à étudier, il forme un élément de la chaîne des conducteurs du circuit.

III. — AMPÈREMÈTRES

Divers types d'appareils sont utilisés ; nous en citerons deux.

I. — APPAREILS THERMIQUES

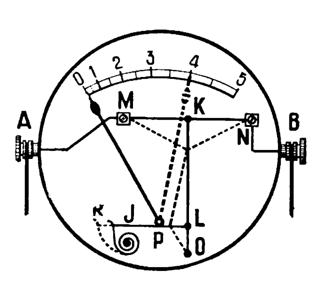
Ils utilisent l'échauffement d'un conducteur par le passage du courant.

L'élévation de température du fil MN (alliage argent-platine), tendu à froid entre deux points fixes, s'accompagne d'une dilatation, fonction du courant parcourant ce fil.

Le milieu K du fil MN est tiré par un dispositif déformable entraîné par un ressort R.

Une aiguille mobile en face d'un cadran suit, en les amplifiant, les déplacements du point K.

Le phénomène thermique, dû au passage du courant, n'étant pas polarisé, *le sens du déplacement de l'aiguille est indépendant du sens de passage du courant*



Remarque.

L'aiguille prend très lentement sa position d'équilibre et revient lentement au zéro.

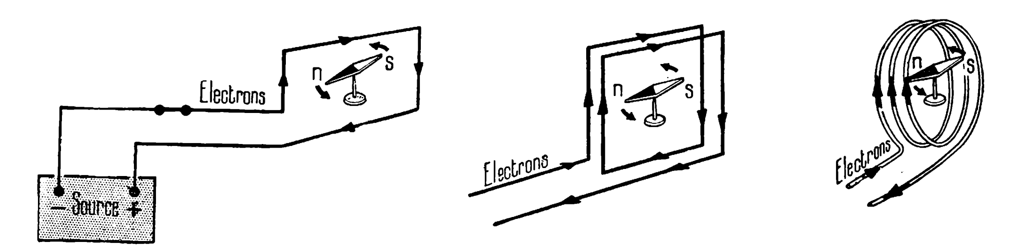
L'appareil est influencé par la température extérieure. Les graduations du cadran sont serrées au voisinage du zéro.

L'appareil est assez peu précis et nécessite des réglages fréquents.

2. — APPAREILS MAGNÉTOÉLECTRIQUES A AIMANTS

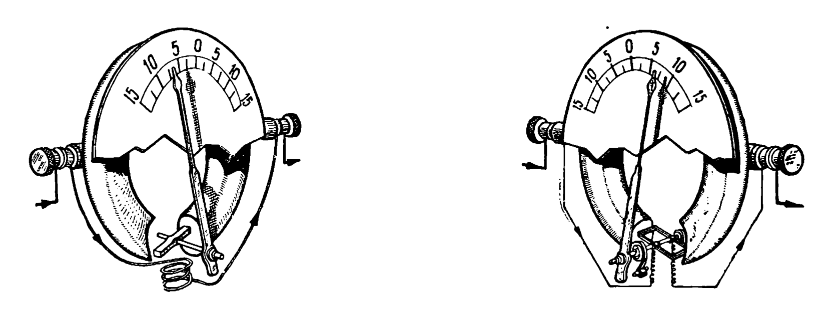
Ils utilisent l'effet magnétique du courant (leçon précédente, règle de l'observateur d'Ampère). Pour les mêmes conditions initiales, *la déviation de l'aiguille aimantée est fonction du courant qui parcourt le conducteur.*

(Vérification en utilisant différentes sources pour le même circuit.)



a. Considérons un conducteur qui a la forme d'**un cadre**, appliquons la règle d'Ampère : *toutes les actions des côtés du cadre sur une aiguille placée à l'intérieur sont concordantes*, elles s'ajoutent. Il en est de même si le cadre comporte plusieurs spires enroulées dans le même sens. Le cadre peut être circulaire, c'est alors une bobine plate.

Les **appareils à aimant mobile** utilisent cette action. Ils sont utilisés comme indicateurs de sens du courant ; plus rarement comme instruments de mesure (ampèremètres de tableau de bord des automobiles).



b. L'aiguille (ou barreau aimanté) agit également sur le cadre.

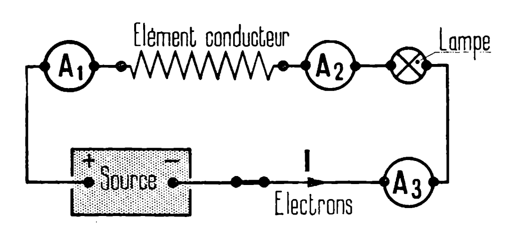
Si le barreau aimanté est maintenu fixe, le cadre mobile parcouru par le courant est soumis à un couple fonction du courant.

Les **ampèremètres à cadre mobile** ou ampèremètres magnétoélectriques sont les appareils de mesure les plus employés ; le barreau aimanté est un aimant en fer à cheval ou circulaire fixé au boîtier.

Dans les ampèremètres magnétoélectriques, à aimant mobile ou à cadre mobile, la déviation est instantanée ; *son sens dépend de celui du courant*, les graduations sont sensiblement équidistantes.

IV. — LOIS FONDAMENTALES DES COURANTS

1. — CONSERVATION DU COURANT ÉLECTRIQUE LE LONG D'UN CIRCUIT SIMPLE



Lorsque les divers éléments conducteurs forment, avec le générateur, un circuit unique, sans dérivation, ***ces éléments conducteurs sont montés en série.***

Placés en des points quelconques d'un tel circuit, divers ampèremètres fournissent la même indication :

tous les conducteurs sont parcourus par le même courant.

Nous pourrons, de cette façon, comparer plusieurs ampèremètres avec l'un d'entre eux choisi comme appareil étalon.

2. — LOI D'ADDITION DES COURANTS DÉRIVÉS

Un générateur alimente divers conducteurs reliés à deux bornes M et N.

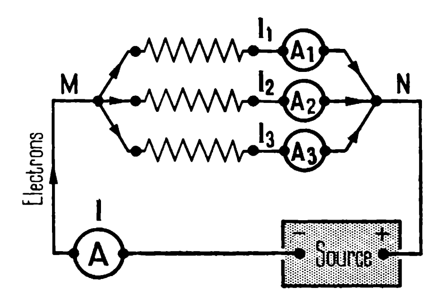
Ces conducteurs sont en dérivation (ou en parallèle) entre M et N.

Des ampèremètres, bien gradués, respectivement montés :

— sur le conducteur commun d'alimentation, par lequel le générateur débite le courant I ;

— sur les diverses dérivations,

indiquent les courants I d'une part et I_1, I_2, I_3... d'autre part, tels que :



$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2 + \mathbf{I}_3 + \ldots$$

EXERCICES

1 — Une batterie d'accumulateurs a une capacité de 45 Ah lorsqu'elle est déchargée à courant constant, en 7 h 30 mn ; elle restitue les 0,85 de la quantité d'électricité nécessaire à sa charge normale en 10 h.
Calculer les courants de charge et de décharge. (C. A. P.)

Réponses : 5,3 A ; 6 A.

2 — Une source alimente simultanément les appareils suivants montés en dérivation : une lampe qui absorbe 0,75 A, un réchaud qui absorbe 2,5 A, un moteur qui absorbe 1,25 A.
Calculer le courant fourni par la source et la quantité d'électricité débitée à régime constant pendant 2 h 40 mn.

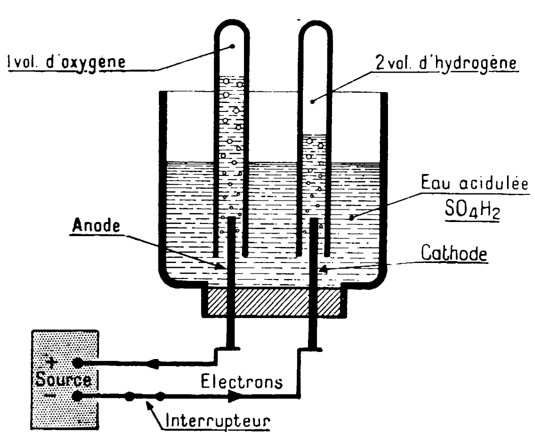
Réponses : 4,5 A ; 43 200 C ou 12 Ah.

6. — Effet chimique du courant. Électrolyse. Loi de Faraday

I. — ÉTUDE QUALITATIVE DE L'ÉLECTROLYSE

I. — ÉLECTROLYSE DE L'EAU ACIDULÉE

Étudions la décomposition par le courant électrique d'eau contenant quelques gouttes d'acide sulfurique.



a. **Voltamètre.**

C'est un récipient de verre, par exemple, muni de deux tiges conductrices inattaquables par l'acide sulfurique, les **électrodes** (platine ou charbon de cornue) reliées à deux **bornes** extérieures.

L'électrode reliée au + de la source, ou électrode positive, est l'anode ; l'électrode reliée au — de la source, ou électrode négative, est la cathode (ou catode).

b. **Expérience.**

Le voltamètre contenant de l'eau acidulée est connecté aux bornes d'un accumulateur.

Des bulles de gaz apparaissent aux électrodes.

Nous recueillons dans deux éprouvettes :

un volume d'oxygène à l'anode et deux volumes d'hydrogène à la cathode.

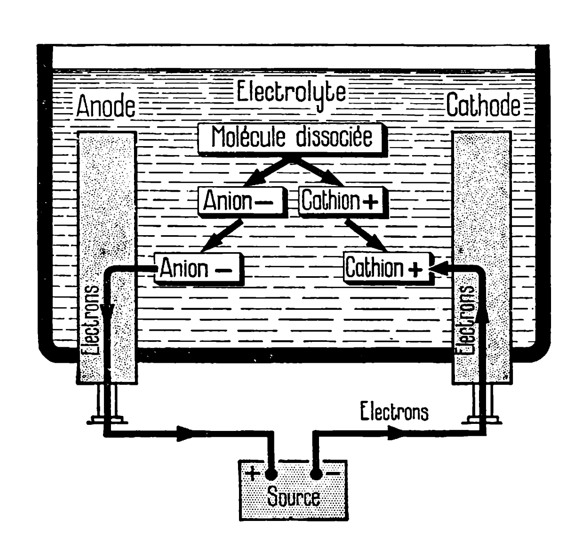
Ces produits obtenus correspondent à la composition de l'eau.

Le mélange de ces deux gaz peut donner, par combustion (mélange tonnant), de l'énergie thermique.

Cette énergie a été fournie par le courant électrique.

2. — MÉCANISME DE L'ÉLECTROLYSE

Les liquides susceptibles d'être décomposés par le passage du courant sont des **électrolytes**, corps composés : acides, bases ou sels.



En dissolution, un certain nombre de molécules de ces corps se dissocient en deux sortes d'**ions** :

— *les anions, chargés négativement* (présentent un excès d'électrons), *sont attirés par l'anode (positive) ;*

— *les cathions, chargés positivement* (présentent un manque d'électrons), *sont attirés par la cathode (négative).*

Dans le cas de l'acide sulfurique (SO_4H_2), il se forme :

1 anion SO_4^{--} portant 2 électrons ;

2 cathions H^+ ayant perdu ces 2 électrons.

La molécule initiale était neutre ; la solution est électriquement neutre.

Dans le voltamètre, chaque anion (ion négatif) cède à l'anode un certain nombre d'électrons qui partent vers la source. Chaque cathion (ion positif) prend à la cathode un nombre égal d'électrons venant de la source.

Résultat : *le nombre d'électrons circulant dans les fils de connexion (courant) est proportionnel au nombre des ions mis en jeu.*

Les ions, en perdant leur charge, constituent la matière qui apparaît sur les électrodes.

Tout se passe, pour le circuit extérieur, comme si le courant d'électrons (poussés par le générateur), c'est-à-dire le courant électrique, avait traversé l'électrolyte.

3. — RÉACTIONS SECONDAIRES

a. **Électrolyse de la solution sulfurique.**

A la cathode, de l'hydrogène apparaît :

$$2\ H^+ + 2 \text{ charges } (—) \text{ venant de la source} \rightarrow H_2 \nearrow$$

A l'anode, on ne voit pas SO_4 ; il y a eu *transformation chimique.*

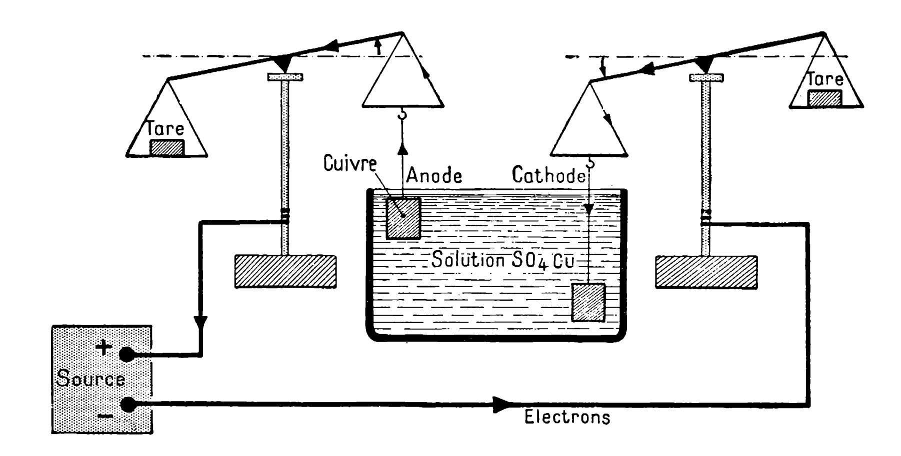
$$SO_4^{--} + H_2O \rightarrow SO_4H_2 + \frac{1}{2} O_2 \nearrow + 2 \text{ charges } (—) \text{ allant à la source.}$$

Cette ***réaction secondaire***, chimique, a masqué le phénomène électrolytique, et ce sont finalement les constituants de l'eau qui sont libérés.

b. **Électrolyse du sulfate de cuivre avec anode de cuivre.**

1 molécule $SO_4Cu \rightarrow$ anion SO_4^{--} + cathion Cu^{++},
à l'anode $SO_4^{--} + Cu \rightarrow SO_4Cu$ + 2 charges (—) allant à la source,
à la cathode Cu^{++} + 2 charges (—) venant de la source $\rightarrow$ Cu qui se dépose.

La composition de la solution ne change pas, la masse de cuivre libre ne change pas : *l'électrolyse n'a pas absorbé d'énergie.*



L'anode a perdu du métal au profit de la cathode.

Ce type d'électrolyse, avec « anode soluble », est employé dans l'industrie pour cuivrer, nickeler, chromer, argenter...

On utilise une anode et un électrolyte appropriés ; la pièce à recouvrir d'un dépôt métallique constitue la cathode.

II. — ÉTUDE QUANTITATIVE

1. — QUANTITÉ DE MATIÈRE ET QUANTITÉ D'ÉLECTRICITÉ

Nous venons de voir (§ 2) que le nombre d'électrons mis en jeu (quantité d'électricité) est proportionnel au nombre d'ions transportés (quantité de matière).

Nous pouvons donc déterminer la quantité d'électricité ayant traversé un voltamètre par la mesure de la masse des cathions recueillis dans un électrolyte donné.

Avant le 14 janvier 1948, on utilisait ce phénomène pour définir le coulomb et l'ampère :

Le* coulomb, *est $\left(\text{avec la précision du } \frac{1}{100\,000}\right)$ la quantité d'électricité qui, par électrolyse d'une solution aqueuse de nitrate d'argent NO_3Ag, dépose 1,11800 mg d'argent à la cathode.

L'*ampère *est, alors, l'intensité d'un courant constant qui dépose, par électrolyse de cette solution, 1,11800 mg d'argent par seconde à la cathode de ce voltamètre.

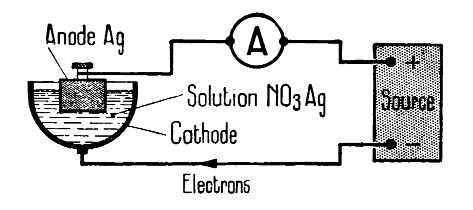
2. — ÉTALONNAGE D'UN AMPÈREMÈTRE

Constituons un circuit comprenant :

— un générateur à *débit constant* ;

— l'ampèremètre à étalonner ;

— un voltamètre à « anode soluble » en argent ; l'électrolyte est une solution aqueuse de nitrate d'argent (à 20 ‰) ; la cathode est une capsule de platine bien décapée.



Faisons passer un courant assez faible (condition pour avoir un dépôt adhérent), constant, pendant 30 minutes.

L'aiguille de l'ampèremètre reste fixe à la division 40. La cathode accuse une augmentation de poids de 402 mg.

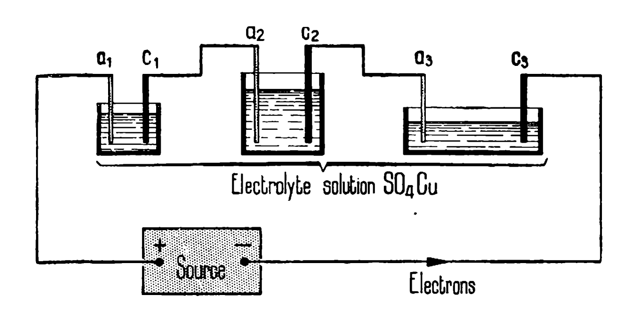
Le nombre de coulombs mis en jeu est $\frac{402}{1{,}118} = 360$ en 1 800 secondes

Le courant est $I = \frac{360}{1\,800} = 0{,}2$ A.

La division 40 de l'ampèremètre correspond à 0,2 A.

Si le nombre de divisions indiqué est proportionnel au courant, une division du cadran vaut $\frac{0{,}2}{40} = 0{,}005$ A ou 5 mA.

3. — GÉNÉRALISATION. LOIS DE FARADAY [1]

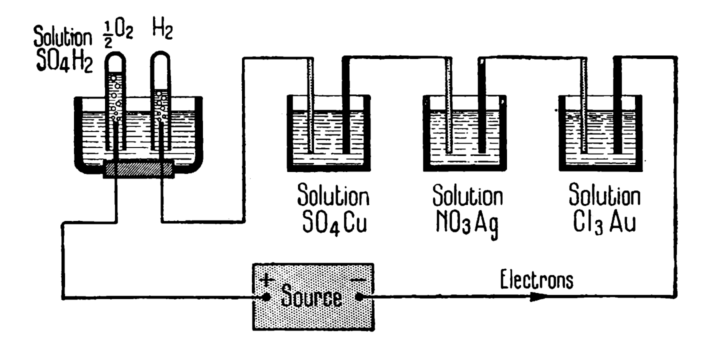


a. La théorie précédente montre que, pour un électrolyte donné, *la masse de matière déposée* (proportionnelle au nombre des ions) *ne dépend ni des dimensions du voltamètre ou des électrodes, ni de la concentration de l'électrolyte.*

Plaçons en série plusieurs voltamètres, de dimensions quelconques, contenant des solutions aqueuses différentes du même électrolyte, sulfate de cuivre, par exemple.

Au bout d'un temps quelconque, les augmentations de masse de toutes les cathodes sont les mêmes.

b. La masse déposée dépend de la nature du cathion.



Plaçons en série des voltamètres à électrolytes différents, par exemple :

— solution aqueuse d'acide sulfurique, cathion hydrogène (sa masse sera calculée en fonction du volume recueilli, 1 g pour 11,2 l dans les conditions normales) ;
— solution aqueuse de sulfate de cuivre, cathion cuivre ;
— solution aqueuse de nitrate d'argent, cathion argent ;
— solution aqueuse de chlorure d'or, cathion or.

(1) Faraday : physicien anglais (1791-1867).

Au bout d'un certain temps de passage du courant, les masses recueillies à la cathode sont respectivement m_1, m_2, m_3, m_4, proportionnelles aux nombres 1, 32, 108 et 65,6. Ces nombres représentent pour chaque cathion le quotient $\frac{a}{n}$ de la masse atomique a du cathion considéré par n, sa valence dans l'électrolyte considéré (par exemple, le cathion fer est bivalent dans les sels ferreux et trivalent dans les sels ferriques).

Ce quotient $\frac{a}{n}$, dont les valeurs, pour les électrolytes considérés, sont respectivement $\frac{1}{1}$, $\frac{64}{2}$, $\frac{108}{1}$ et $\frac{197}{3}$, est appelé ***valence gramme du cathion.***

c. Conclusion.

La masse M du cathion libérée au cours de l'électrolyse est :

1° proportionnelle à la quantité d'électricité Q qui a traversé le voltamètre ;

2° proportionnelle à la valence gramme $\frac{a}{n}$ du cathion.

Par suite, $M = K \frac{a}{n} Q$, où la constante K dépend des unités choisies.

Or 1 coulomb dépose 1,118 mg de cathion argent pour lequel Ag = 107,88 g, nous pouvons écrire :

$$0{,}001118 = K \times \frac{107{,}88}{1} \times 1, \quad \text{d'où} \quad K = \frac{1}{96\,500}.$$

Il faut 96 500 coulombs pour libérer une valence gramme d'un cathion quelconque.

En tenant compte de la relation Q coulombs = I ampères × t secondes, dans le cas d'un courant constant, on obtient :

la relation de Faraday

$$\mathbf{M = \frac{1}{96\,500} \times \frac{a}{n} \times I \times t}$$

M et a grammes,
I ampères, t secondes.

Exemple.

Un courant constant de 5 A, traversant pendant 5 mn un voltamètre à sulfate de cuivre (Cu = 64, n = 2), libère $M = \frac{1}{96\,500} \times \frac{64}{2} \times 5 \times 300 = 0{,}5$ g, environ, de cuivre à la cathode.

EXERCICES

1 — Le cadran d'un ampèremètre porte 100 divisions équidistantes, cet appareil est construit pour que sa déviation soit proportionnelle au courant qui le traverse.
On veut l'étalonner en le montant dans un circuit en série avec un voltamètre à nitrate d'argent (anode soluble en argent).
Au bout de 1/2 heure, pendant laquelle l'aiguille de l'ampèremètre reste fixe en face de la division 70, on constate une augmentation de masse de 0,704 g à la cathode.
Que vaut une division de l'ampèremètre ? Quelle est la limite supérieure d'emploi de l'appareil en série sur le circuit ?

Réponses : 0,005 A ; 0,5 A.

2 — Pour obtenir un dépôt adhérent dans un bain de nickelage à froid, on admet une densité de courant de 0,6 A par dm^2 de cathode.
Quelle est la durée de l'opération pour obtenir un dépôt de 2/100 mm d'épaisseur de nickel ? On supposera que le rendement électrique de l'opération est de 0,85 ; masse atomique du nickel Ni = 58,7 ; valence 2 ; densité 8,68.

Réponse : environ 3 heures.

3 — Quelle est l'intensité d'un courant constant qui dépose 135 mg de cuivre à la cathode d'un voltamètre à sulfate de cuivre en 16 mn ? Le cuivre est bivalent, masse atomique 63,4.

Réponse : 0,43 A.

4 — Une molécule-gramme d'hydrogène occupe (dans les conditions normales) un volume de 22,4 l. Calculer le volume, mesuré dans les mêmes conditions, de l'hydrogène dégagé par le passage de 1 coulomb dans un voltamètre à eau acidulée.

Réponse : 0,116 cm^3.

5 — Calculer le courant électrique traversant un bac d'électrolyse pour la fabrication du cuivre électrolytique, lorsqu'on obtient 1 kg de cuivre à l'heure (valence-gramme du cuivre $\frac{63,4}{2}$).

Réponse : environ 850 A.

6 — On veut étalonner un compteur de quantité d'électricité (ampèreheuremètre) placé sur un circuit en série avec un voltamètre à nitrate d'argent, anode en argent.
Est-il nécessaire que le courant circulant dans le circuit soit constant pendant la durée de l'étalonnage ?
La cathode du voltamètre a augmenté de masse de 15,80 g quand le compteur a enregistré 4 Ah, quelle est en pour cent l'erreur relative (préciser son sens) sur la mesure effectuée par le compteur ?

Réponse : non ; 1,9 % environ par excès.

7 — Deux plaques de cuivre, A de 4 cm^3 et B de 3 cm^3 sont suspendues par des fils isolants sous les deux plateaux vides d'une balance, elles plongent complètement dans une solution de sulfate de cuivre ; alimentées par une source de courant continu, elles constituent les deux électrodes d'un voltamètre.
Quelle doit être la cathode ? Quel courant doit traverser ce voltamètre pour que la balance revienne à l'équilibre au bout de 1 heure. (Cu = 64, bivalent, masse spécifique 8,8 g/cm^3.)

Réponse : 3,7 A.

7. — Énergie fournie à un récepteur

I. — DIFFÉRENCE DE POTENTIEL-VOLT

I. — RÉCEPTEUR

On appelle ainsi tout système qui transforme de l'énergie électrique en énergie : thermique, mécanique, chimique...

Exemple.

Un moteur soulève une charge à vitesse constante, en régime constant.

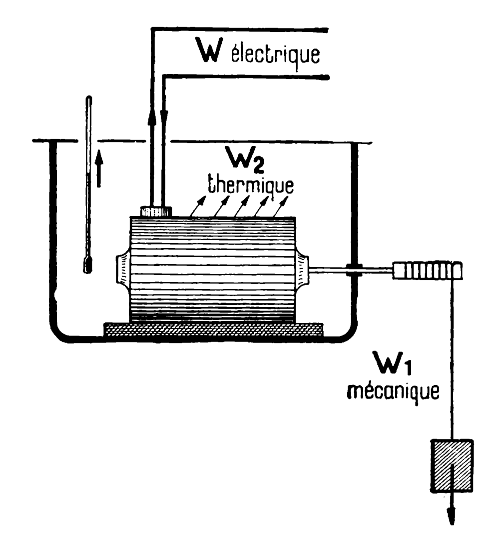
a. *Il effectue un travail utile :* soit W_1 l'énergie mécanique mise en jeu pendant un certain temps.

b. *De la chaleur apparaît dans le moteur et le milieu ambiant :* soit W_2 l'énergie thermique apparue pendant le même temps.

Le courant a fourni au moteur l'énergie

$$W = W_1 + W_2$$

La quantité d'électricité Q coulombs a fourni cette énergie W joules.



2. — DIFFÉRENCE DE POTENTIEL

a. Définition.

Au cours de la transformation précédente, chaque coulomb a cédé, en traversant le moteur, l'énergie $\frac{W}{Q}$.

Par définition, cette perte d'énergie de chaque coulomb mesure la différence de potentiel ou *chute de tension* entre A et B (bornes d'alimentation du moteur).

Cette différence de potentiel est désignée par le symbole U

$$\mathbf{U} = \frac{\mathbf{W}}{\mathbf{Q}}$$

b. **Interprétation.**

L'énergie électrique fournie a été prise à l'énergie potentielle des électrons. Avant d'entrer dans le moteur, ils étaient « comprimés » ; à leur sortie, ils sont « détendus ». Ils ont subi une « variation de pression » ou « différence de potentiel ».

c. **Relation fondamentale.**

Dans la pratique, la quantité d'électricité Q ne se prête pas à une mesure directe ; en régime permanent, elle est évaluée par la relation $Q = It$.

Nous pouvons écrire, dans ce cas :

$$U = \frac{W}{Q} = \frac{W}{It} = \frac{1}{I} \times \frac{W}{t} = \frac{P}{I}$$

$$\mathbf{U} = \frac{\mathbf{P} \text{ puissance absorbée par le récepteur}}{\mathbf{I} \text{ courant dans le récepteur}}$$

3. — UNITÉ : LE VOLT (1 V)

Dans l'expression $U = \frac{P}{I}$, P s'exprime en watts, I en ampères, U en volts.

Par définition : ***le volt est la différence de potentiel électrique qui existe entre deux points d'un conducteur, lorsqu'un courant constant de 1 ampère libère entre ces deux points une puissance de 1 watt.***

Multiple :	le *kilovolt*	1 kV = 1 000 V
Sous-multiple :	le *millivolt*	1 mV = 0,001 V

Relations utilisées :

$$\mathbf{W = UQ = UI}t$$

W joules, U volts, Q coulombs, I ampères, *t* secondes.

$$\mathbf{P = UI}$$

P watts, U volts, I ampères.

Exemple.

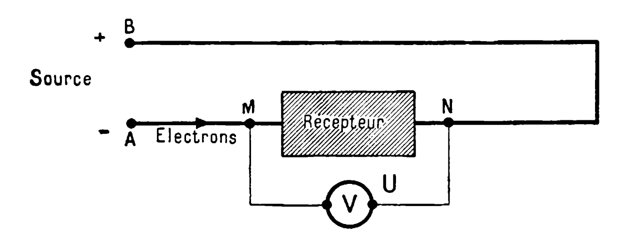
Un récepteur, alimenté sous la tension U = 120 V, absorbe un courant constant de 10 A.

La puissance électrique mise en jeu est $P = UI = 120 \times 10 = 1\,200$ W

L'énergie consommée au bout de 15 mn par exemple est :

$$W = UIt = 120 \times 10 \times 15 \times 60 = 1\,080\,000 \text{ J}$$

4. — MESURE : LE VOLTMÈTRE

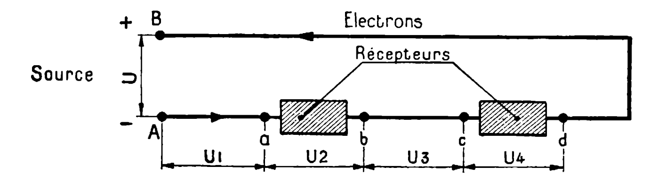


Pour mesurer la différence de potentiel U entre deux points M et N d'un circuit, on branche, en dérivation entre ces deux points, un voltmètre qui n'absorbe pas sensiblement de courant.

Les propriétés et le principe de fonctionnement de cet appareil seront étudiés plus loin (leçon 8).

II. — LOI FONDAMENTALE DES TENSIONS

1. — CHUTE DE TENSION LE LONG D'UN CIRCUIT



Entre deux points situés dans deux sections différentes d'un circuit parcouru par un courant, il existe une différence de potentiel.

L'énergie totale W, libérée ou emmagasinée par les conducteurs et les récepteurs du circuit, est fournie par la source, sous forme d'énergie électrique.

Si W_1, W_2, W_3 sont les valeurs de l'énergie apparue dans chacun des récepteurs ou conducteurs, le principe de la conservation de l'énergie nous permet d'écrire : $W = W_1 + W_2 + W_3$, or Q coulombs ont traversé tous les éléments en série du circuit, nous pouvons donc écrire :

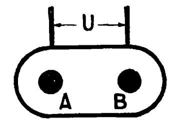
$$\frac{W}{Q} = \frac{W_1}{Q} + \frac{W_2}{Q} + \frac{W_3}{Q}, \quad \text{c'est-à-dire}$$

$$\mathbf{U = U_1 + U_2 + U_3 + \ldots}$$

U ***différence de potentiel entre A et B bornes de la source*** **=** ***Somme des différences de potentiel partielles entre les extrémités de chaque élément.***

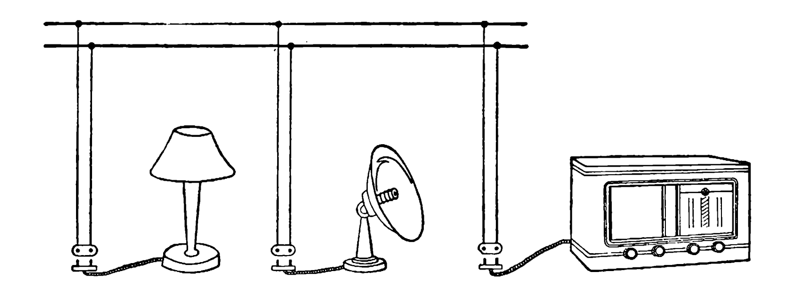
Cette relation importante résulte des définitions précédentes ; elle peut être vérifiée sur un circuit quelconque à l'aide de plusieurs voltmètres.

2. — DISTRIBUTION D'ÉNERGIE A TENSION CONSTANTE



Pour les abonnés d'un réseau, les bornes de la source sont constituées par les deux bornes A et B de la *prise de courant.*

Le réseau assure une tension U constante entre les bornes A et B.



Les appareils récepteurs, lampes, réchauds, moteurs,... sont construits pour fonctionner avec cette différence de potentiel. Des appareils branchés simultanément ***doivent tous être montés en dérivation*** entre les bornes A et B.

Sinon, dans un montage en série, chacun ne disposerait que d'une tension partielle U_1, U_2 ou U_3, dont la somme serait U ; les conditions de fonctionnement de chaque appareil ne seraient pas respectées.

Chaque appareil, défini par sa puissance P et sa tension d'emploi U, prend au réseau un courant I donné par :

$$I \text{ ampères} = \frac{P \text{ watts}}{U \text{ volts}}$$

Exemple.

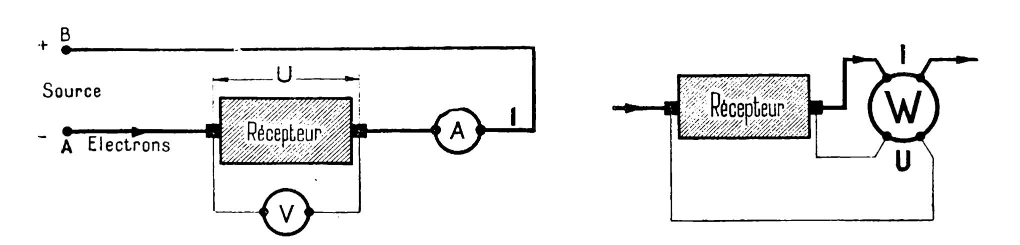
Un réchaud est marqué 360 W-120 V ; en régime normal, c'est-à-dire sous la tension U = 120 V, il prend au réseau un courant $I = \frac{360}{120} = 3$ A

III. — MESURES DE PUISSANCE ET D'ÉNERGIE

1. — MESURE D'UNE PUISSANCE : WATTMÈTRE

La puissance électrique fournie au récepteur est donnée par l'expression :

$$\mathbf{P = UI}$$



La tension U volts est lue au voltmètre monté en dérivation aux bornes du récepteur. Le courant I ampères est lu à l'ampèremètre mis en série avec le récepteur.

Des appareils, appelés ***wattmètres***, *fournissent, par simple lecture, la puissance mise en jeu dans un récepteur.* (Ces appareils comprennent deux circuits, l'un, le circuit principal, mis en série avec le récepteur est le « circuit des ampères » ; l'autre se monte en dérivation aux bornes du récepteur, c'est le « circuit des volts ».)

2. — ÉNERGIE CONSOMMÉE : WATTHEURE

En régime constant l'énergie reçue par un récepteur est

$$\mathbf{W = UI}t, \quad \text{c'est-à-dire} \quad \mathbf{W = P} \times t,$$

W joules, P watts
t secondes.

L'**unité pratique** d'énergie électrique utilisée pour la tarification du courant est le ***wattheure*** (1 Wh).

Un wattheure est l'énergie fournie par une puissance constante de 1 watt pendant 1 heure (1 joule par seconde pendant 1 h).

Donc : **1 Wh = 3 600 J**

Multiples : l'*hectowattheure* (1 hWh) vaut 100 Wh
le *kilowattheure* (1 kWh) vaut 1 000 Wh

Dans la pratique. l'énergie consommée (en régime constant) s'exprime par :

W wattheures = **P** watts × *t* heures.

Exemple.

Un réchaud de 600 W fonctionnant pendant 3 h reçoit du réseau l'énergie :

600 × 3 = 1 800 Wh ou 1,8 kWh.

Prix de cette énergie (à 20 F le kWh) : 20 × 1,8 = 36 F.

Cette énergie exprimée en joules est 1 800 × 3 600 = 6 480 000 J (nombre très grand).

Les **compteurs d'énergie** *sont des appareils* (wattheuremètres) *enregistreurs de toute l'énergie électrique fournie à une installation* comprenant, souvent, plusieurs récepteurs.

Le compteur est intercalé entre le réseau de distribution et l'installation ; il totalise en hWh et kWh l'énergie fournie par le réseau.

EXERCICES

1 — Un récepteur traversé par un courant constant de 2,4 A pendant 20 mn a consommé une énergie de 176 Wh ; quelle est la tension à ses bornes ?

Réponse : 220 V.

2 — Un radiateur porte les indications : 120 V-600 W.
Calculer : le courant qu'il absorbe en régime normal, la quantité d'électricité qui le traverse en 2 h 30 mn, l'énergie électrique absorbée pendant ce temps, la dépense correspondante, à raison de 28 F le kilowattheure, et la chaleur dégagée.

Réponses : 5 A ; 12,5 Ah ou 45 000 C ; 1 500 Wh ou 5 400 000 J ; 42 F ; 1,29 th.

3 — Un compteur d'énergie porte les indications : 220 V-10 A ; un tour du disque vaut 0,5 Wh.
Quelle est la puissance maximum utilisable dans l'installation qu'il contrôle ? Quelle est la vitesse de rotation du disque en tours par minute lorsqu'on allume simultanément 12 lampes marquées 220 V-40 W ?

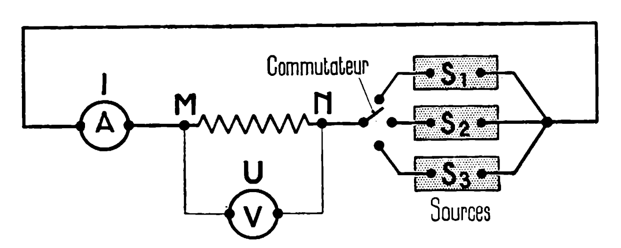
Réponses : 2 200 W ; 16 t/mn.

8. — Loi d'Ohm.
Résistance d'un conducteur — Ohm

I. — INTENSITÉ DU COURANT

1. — LE COURANT DÉPEND DE LA TENSION

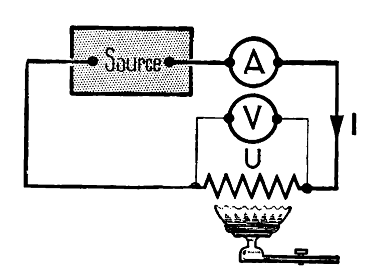
Toute tension U appliquée aux bornes d'un conducteur provoque dans celui-ci le passage d'un courant I.



Aux bornes d'un même conducteur MN, différentes sources (piles ou accumulateurs) créent différentes tensions U_1, U_2, U_3 et provoquent dans ce conducteur le passage de courants différents I_1, I_2, I_3.

Nous pouvons constater que I et U varient dans le même sens :
l'effet varie dans le même sens que la cause.

2. — INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE

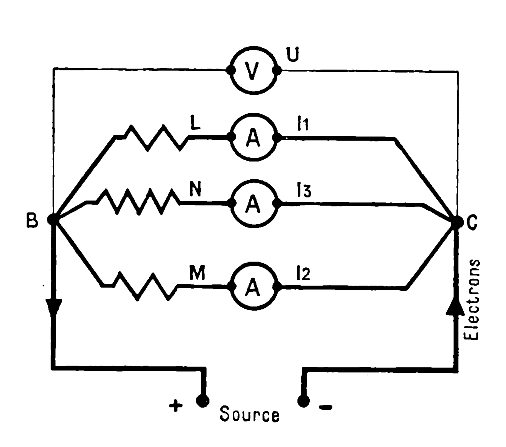


Pour un conducteur donné en fer, en cuivre ou en aluminium par exemple, et une tension U constante à ses bornes, nous pouvons provoquer des variations du courant I par des modifications importantes de température.

Or, le passage du courant dans un conducteur provoque un dégagement de chaleur et une variation de température. La cause, différence de potentiel U, n'intervient donc pas seule dans la valeur du courant I.

Dans les expériences suivantes, nous utiliserons des fils nus refroidis par l'air, parcourus par des courants faibles ; *dans ce cas, les variations du courant I sont dues, pratiquement, aux seules variations de la tension U appliquée aux bornes de ces conducteurs.* (L'étude de l'influence de la température sera reprise dans le chapitre suivant.)

3. — LE COURANT DÉPEND DU CONDUCTEUR



Entre deux points B et C réunis aux bornes d'un générateur, pile ou accumulateur, branchons en dérivation trois fils conducteurs, les deux premiers identiques BLC et BMC (même métal, même longueur, même section), le troisième BNC différent.

Des ampèremètres identiques A, montés sur chaque dérivation, mesurent I_1, I_2, I_3.

Un voltmètre V donne la tension U aux bornes communes B et C.

Le courant établi, nous lisons, par exemple :

$$U = 2\text{ V}, \qquad I_1 = I_2 = 0{,}1\text{ A}$$

et $$I_3 = 0{,}25\text{ A}.$$

Conséquence.

Pour une même tension entre deux points, le courant dépend du conducteur qui les réunit.

4. — LE COURANT EST PROPORTIONNEL A LA TENSION

Dans le montage précédent, à l'aide de générateurs différents, nous pouvons réaliser des différences de potentiel successives entre B et C :

$$U' = 2\text{ U, soit } 4\text{ V} \quad \text{et } U'' = 3\text{ U, soit } 6\text{ V}$$

Nous constatons aux ampèremètres que les courants ont respectivement

— doublé pour U', on a $I'_1 = I'_2 = 0{,}2$ A $I'_3 = 0{,}5$ A,

— triplé pour U'', on a $I''_1 = I''_2 = 0{,}3$ A $I''_3 = 0{,}75$ A.

Conséquence.

Pour un conducteur donné, le courant I est proportionnel à la différence de potentiel U établie entre les extrémités de ce conducteur.

II. — LOI D'OHM

1. — RÉSISTANCE

Dans les conditions de l'expérience précédente, nous pouvons constater que, pour chaque conducteur, le quotient $\frac{U}{I}$ est constant :

soit, pour chacun des deux premiers conducteurs identiques

$$\frac{U}{I_1} = \frac{U'}{I'_1} = \frac{U''}{I''_1} = \frac{2}{0{,}1} = 20$$

et, pour le troisième : $\frac{U}{I_3} = \frac{U'}{I'_3} = \frac{U''}{I''_3} = \frac{2}{0{,}25} = 8$

Cette valeur de $\frac{U}{I}$ caractérise le conducteur considéré.

Le quotient* R $= \frac{U}{I}$ *est appelé la résistance électrique du conducteur.

La relation* U = RI *est l'expression de la loi d'Ohm appliquée à un conducteur ne fournissant que de l'énergie thermique.

2. — INTERPRÉTATION

Le mot résistance implique une difficulté plus ou moins grande qu'éprouvent les électrons à cheminer à travers tel ou tel conducteur.

L'idée d'un courant I (débit) proportionnel à la cause U différence de potentiel (différence de pression électronique), et inversement proportionnel à la résistance R qui fait obstacle à la circulation des électrons, fait partie des relations intuitives de cause à effet : $I = \frac{U}{R}$.

3. — UNITÉ DE RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE : OHM [1] (1 Ω)

L'unité de résistance résulte de la définition $R = \frac{U}{I}$, ***c'est la résistance d'un conducteur qui est parcouru par un courant de 1 ampère quand il existe entre ses bornes une différence de potentiel de 1 volt.***

Sous-multiple : le *microhm* $1\ \mu\Omega = 10^{-6}\ \Omega$
Multiple : le *mégohm* $1\ M\Omega = 10^{6}\ \Omega$

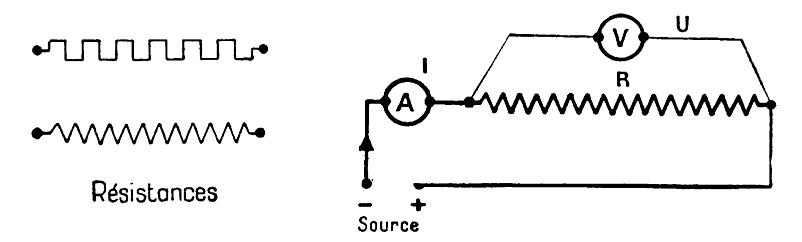
On dispose, *dans les laboratoires*, de boîtes de résistances permettant de réaliser par combinaison le nombre d'ohms voulu entre deux bornes, et, *dans l'industrie*, des éléments de résistance donnée, réalisés en maillechort, ferronickel, acier ou fonte.

(1) Ohm : physicien allemand (1787-1854).

III. — APPLICATIONS DE LA LOI D'OHM

I. — MESURE D'UNE RÉSISTANCE

On introduit cette résistance dans un circuit alimenté par une source.



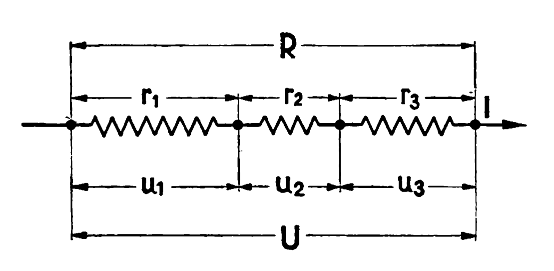
La différence de potentiel U à ses bornes est mesurée au voltmètre.

Le courant I qui la traverse est mesuré à l'ampèremètre. On en déduit la valeur de la résistance, pour la température à laquelle se trouve ce conducteur.

$$\mathbf{R} \text{ ohms} = \frac{\mathbf{U} \text{ volts}}{\mathbf{I} \text{ ampères}}$$

2. — ASSOCIATION DE RÉSISTANCES EN SÉRIE

La résistance totale R d'un ensemble de conducteurs en série, dont les résistances sont respectivement r_1, r_2, r_3,..., est la somme de ces résistances partielles.



On peut vérifier ce résultat par l'expérience, il est en accord avec les conclusions de l'étude précédente.

En effet, $U = U_1 + U_2 + U_3 + ...$; le même courant I traversant tous ces éléments en *série*, nous pouvons écrire

$$\frac{U}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} + \frac{U_3}{I} + ...$$

c'est-à-dire :

$$\mathbf{R} = r_1 + r_2 + r_3 + ...$$

La notion de résistance, obstacle au passage du courant, implique l'addition des difficultés successives que rencontre ce courant en traversant les conducteurs en série.

Remarque.

Pour une tension donnée U, en général celle du réseau, la résistance R d'un ***récepteur thermique*** détermine le courant I demandé au réseau lorsque ce récepteur est connecté :

$$\text{I ampères} = \frac{\text{U volts}}{\text{R ohms}}$$

3. — CHUTE DE TENSION DANS LES CONNEXIONS

Pour conserver aux bornes des appareils récepteurs la plus grande différence de potentiel possible, et pour ne pas gaspiller d'énergie, il y a intérêt à utiliser des connexions de très faible résistance.

En effet, pour une valeur I du courant, la chute de tension dans ces connexions, de résistance r, s'exprime par $u = r\text{I}$ (u en volts, r en ohms, I en ampères) et la perte de puissance par $p = u\text{I}$ (p en watts).

Exemple.

La tension U aux bornes de la source (prise de courant) est 120 V, le courant I traversant les connexions et le récepteur est 10 A.

Dans le cas où les connexions ont une résistance $r = 0{,}5\ \Omega$, elles provoquent une chute de tension : $u = r\text{I} = 0{,}5 \times 10 = 5$ V

et une perte de puissance : $p = u\text{I} = 5 \times 10 = 50$ W

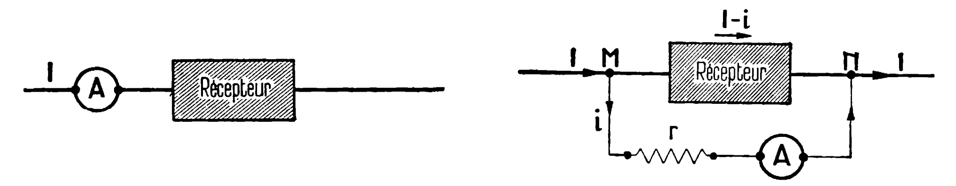
Le récepteur ne dispose plus que de la tension : $\text{U}' = \text{U} - u = 120 - 5 = 115$ V pour une puissance reçue de $\text{P} = \text{U}'\text{I} = 1\,150$ W

4. — APPAREILS DE MESURE

a. Remarque sur les ampèremètres.

Pour mesurer le courant I dans un circuit, nous montons en série dans ce circuit l'ampèremètre A.

L'introduction de l'appareil de mesure ne doit pas modifier sensiblement la grandeur I à mesurer : *il faut donc qu'un ampèremètre présente une résistance très faible* (pratiquement négligeable devant celle du circuit considéré).



b. Voltmètre.

Soit à mesurer la différence de potentiel U entre deux points M et N d'un circuit parcouru par le courant I.

Établissons entre M et N une dérivation composée d'un ampèremètre A et d'une résistance r, soit R la résistance constante de cette dérivation. D'après la loi d'Ohm, le courant i dans l'appareil est $i = \frac{U}{R}$.
Le courant i est proportionnel à U ; le cadran de l'appareil peut donc être graduée en volts : nous avons réalisé un voltmètre.

α. ***La résistance R doit être très grande.***

En effet, la dérivation MAN a introduit une perturbation dans le circuit étudié, une partie i du courant I est déviée de son parcours initial, et la tension U′ mesurée diffère de la tension primitive U à mesurer.
Si R_1 est la résistance de l'élément primitif MN en appliquant la loi d'Ohm, $U' = (I - i) \times R_1$, tandis que $U = I \times R_1$.
On peut confondre U et U′ lorsque i est négligeable devant I. Pour cela R doit être très grand devant R_1.

β. ***L'ampèremètre A doit être très sensible*** puisque le courant dans l'appareil doit être très faible.

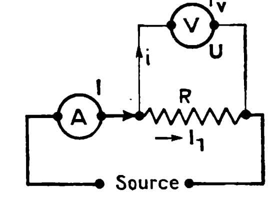
γ. ***Réalisation.***

Un voltmètre est constitué par un ampèremètre très sensible (thermique ou magnéto-électrique) *en série avec une très grande résistance additionnelle* r.

c. *Remarque sur la mesure d'une résistance.*

α. Dans la mesure d'une résistance R au § 1 il n'a pas été tenu compte de la résistance des appareils : r_A celle de l'ampèremètre, r_v celle du voltmètre.

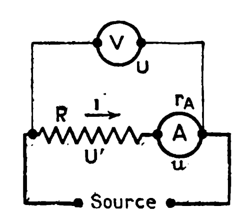
Dans le montage utilisé, appelé ***montage aval,*** le voltmètre mesure la tension U (exacte) aux bornes de la résistance R, tandis que l'ampèremètre mesure le courant I, somme des courants I_1 qui traverse R et i qui traverse le voltmètre, $i = \frac{U}{r_v}$.



La valeur exacte (à la précision des appareils près) de la résistance à mesurer est $R = \frac{U}{I_1} = \frac{U}{I - i}$, alors que la valeur approchée déjà trouvée est $R' = \frac{U}{I}$.

Dans ce montage, R et R′ diffèrent d'autant moins que i est faible devant I, c'est-à-dire que la résistance du voltmètre r_v est grande devant la résistance R à mesurer.

β. Dans le montage ci-après, appelé ***montage amont,*** l'ampèremètre mesure le courant I qui traverse effectivement la résistance R, mais le voltmètre mesure la tension U, somme des tensions U′ aux bornes de R et u aux bornes de l'ampèremètre, $u = I \times r_A$.



La valeur exacte (à la précision des appareils près) de la résistance à mesurer est $R = \frac{U'}{I} = \frac{U - u}{I} = \frac{U}{I} - r_A$, alors que la valeur approchée résultant de la loi d'Ohm appliquée directement est $R' = \frac{U}{I}$.

Dans ce montage R et R′ diffèrent de r_A, cette différence devient négligeable si la résistance r_A de l'ampèremètre est très faible devant la résistance R à mesurer.

EXERCICES

1 — Calculer, en régime de fonctionnement normal, le courant absorbé et la résistance électrique pour les appareils suivants :
une lampe marquée 120 V-30 W ; une lampe 120 V-60 W ; un réchaud 120 V-200 W.
Réponses : 0,25 A ; 0,5 A ; 2,5 A. — 480 Ω ; 240 Ω ; 48 Ω.

2 — Entre deux fils conducteurs maintenus à une différence de potentiel de 110 V, on monte en dérivation 100 lampes à incandescence ayant chacune une résistance de 120 Ω en régime. Trouver le courant qui passe dans chacune, le courant total et la résistance pour l'ensemble des lampes. (C. A. P.)
Réponses : 0,916 A ; 91,6 A ; 1,2 Ω.

3 — Trois résistances, R_1, R_2, R_3, sont associées en série et l'ensemble est alimenté sous une différence de potentiel constante de 120 V.
R_1 vaut 12 Ω, le courant qui parcourt cette résistance est 2,5 A. Aux bornes de R_2, la différence de potentiel est 70 V. Quelle est la puissance dissipée dans R_3 ?
Réponse : 50 W.

4 — Quelle est la résistance d'une lampe qui consomme une énergie de 0,5 hWh en 20 minutes sous la tension de 120 V ?
Réponse : 96 Ω.

5 — Une automotrice électrique, attelée à un wagon, monte, à la vitesse constante de 36 km/h, une rampe de 2 %. Le poids total de la rame est 80 tonnes-poids, on admettra une résistance au roulement de 3 % du poids des véhicules. Le rendement des moteurs est 0,8.

1° Quel est le courant absorbé pour une tension d'utilisation de 1 500 V ?

2° En un point du trajet où la ligne d'alimentation présente, depuis la source, une résistance de 0,2 Ω, quelle est, pour ce régime, la chute de tension en ligne, et la perte de puissance en ligne ?

Réponses : 327 A ; 65 V ; 21,2 kW.

6 — Un milliampèremètre de résistance 20 Ω présente une déviation totale pour un courant de 10 mA, quelle résistance additionnelle doit-on lui incorporer pour le transformer en voltmètre utilisable jusqu'à 60 V ?
Réponse : 5 980 Ω.

7 — On dispose d'un voltmètre de résistance 6 000 Ω et d'un ampèremètre de résistance 0,1 Ω.

a. Pour la mesure d'une résistance R_1, en montage amont on lit : au voltmètre U = 6 V, à l'ampèremètre I = 1,6 A, déterminer l'erreur en pour cent sur R_1 si on se contente de la valeur approchée $R = \frac{U}{I}$.

b. Pour la mesure d'une résistance R_2, en montage aval on lit : au voltmètre U = 30 V, I = 0,25 A ; déterminer l'erreur, en pour cent, sur R_2 si on se contente de la valeur approchée $R = \frac{U}{I}$.

Réponses : 2,7 % par excès ; 2 % par défaut.

9. — Résistance. Résistivité

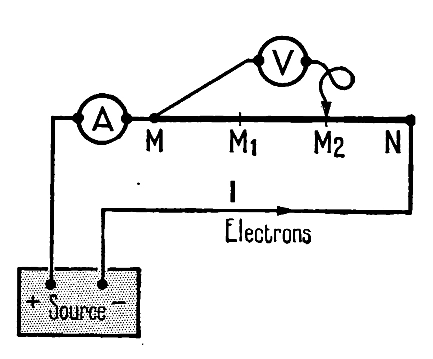
I. — RÉSISTANCE D'UN CONDUCTEUR FILIFORME

I. — INFLUENCE DE LA LONGUEUR

Première expérience.

Appliquons la méthode de mesure d'une résistance à un fil MN de ferronickel, bien calibré, section de diamètre 6/10 mm, longueur 1,5 m (fil utilisé pour la confection de réchauds à feu nu).

Dans chaque expérience, nous éviterons l'élévation de température du fil en faisant rapidement les lectures et en laissant le circuit ouvert un intervalle de temps suffisant entre deux mesures.



Le voltmètre est branché entre M et une pince mobile le long de MN. La source est une batterie d'accumulateurs de 6 V.

Pour les positions successives de la pince en M, M_1, M_2, N, distantes les unes des autres de 50 cm, le voltmètre indique respectivement 0 V, 2 V, 4 V, 6 V ; l'ampèremètre marque constamment 1,5 A.

Tableau des résultats :

ÉLÉMENT considéré	I ampères	U volts	$R = \frac{U}{I}$ ohms	LONGUEUR en cm
MM............	1,5	0	0	0
MM_1...........	1,5	2	1,33	50
MM_2...........	1,5	4	2,67	100
MN	1,5	6	4	150

La comparaison des deux dernières colonnes permet d'énoncer une première loi :

La résistance d'un conducteur homogène, bien calibré, est proportionnelle à sa longueur.

2. — INFLUENCE DE LA SECTION

Deuxième expérience.

Effectuons des mesures analogues avec un fil M'N', de même métal, de même longueur, mais de section différente, par exemple de diamètre 4/10 mm, reportons les résultats dans un second tableau; soit R' les valeurs des nouvelles résistances.

ÉLÉMENT	I' ampères	U' volts	R' ohms $= \frac{U'}{I'}$	LONGUEUR utilisée (cm)
M'M'	$0{,}67 = \frac{2}{3}$	0	0	0
$M'M'_1$	0,67	2	3	50
$M'M'_2$	0,67	4	6	100
M'N'...........	0,67	6	9	150

Comparons les valeurs de R' de ce tableau aux valeurs correspondantes de R dans le tableau précédent, pour des éléments de même longueur :

$$\frac{R}{R'} = \frac{1{,}33}{3} = \frac{2{,}67}{6} = \frac{4}{9}$$

Dans le premier cas, la section du fil est $s = \frac{\pi}{4}\left(\frac{6}{10}\right)^2$ mm²

Dans le second cas, la section est $s' = \frac{\pi}{4}\left(\frac{4}{10}\right)^2$ mm²

On a $$\frac{s'}{s} = \frac{4^2}{6^2} = \frac{16}{36} = \frac{4}{9}$$

On peut donc écrire $$\frac{R}{R'} = \frac{s'}{s} = \frac{\frac{1}{s}}{\frac{1}{s'}}$$

Ce qui permet d'énoncer une seconde loi :

La résistance d'un conducteur de nature et de longueur données varie en raison inverse de sa section.

3. — INFLUENCE DE LA NATURE

En mesurant la résistance de fils de 1,5 m de longueur, de diamètre $\frac{6}{10}$ mm, on obtient :

— pour le fer R = 0,5 Ω,
— pour le cuivre R = 0,08 Ω,
— pour l'aluminium R = 0,13 Ω.

4. — CONCLUSION

A température constante, la résistance d'un conducteur dépend donc de ses dimensions, longueur l et section s, ainsi que de sa nature.

II. — RÉSISTIVITÉ D'UN MATÉRIAU

1. — DÉFINITION

Les lois de proportionnalité précédentes se traduisent par la relation :

$$\boxed{R = \rho \frac{l}{s}}$$

(ρ, lettre grecque, se lit *rô*),

ρ, ***facteur caractéristique du matériau conducteur, est sa résistivité.***

2. — UNITÉS

La résistance R *est exprimée en ohms, la longueur l en cm, la section s en centimètres carrés.*

Pour un conducteur de 1 cm de longueur et 1 cm² de section, $R = \rho \times \frac{1}{1}$.

La résistivité d'un conducteur est donc numériquement égale à la résistance d'un élément de ce conducteur, homogène, bien calibré, de 1 cm de longueur et de 1 cm² de section.

On peut écrire : $\rho = R \times \frac{s}{l}$

La résistivité s'exprime en ohm $\times \frac{cm^2}{cm}$, unité $1\ \Omega . cm^2/cm$.

Sous-multiple, employé pour les très faibles résistivités (cas des métaux) :

le *microhm* cm^2/cm, $1\ \mu\Omega . cm^2/cm = 10^{-6}\ \Omega . cm^2/cm$.

Multiple, employé pour les très grandes résistivités (cas des isolants) :

le *mégohm* cm^2/cm, $1\ M\Omega . cm^2/cm = 10^6\ \Omega . cm^2/cm$

(on rencontre souvent les désignations abrégées $\Omega . cm$, $\mu\ \Omega . cm$ et $M\Omega . cm$).

Résistivité de quelques corps.

Conducteurs métalliques à 0° C	ρ en $\mu\Omega . cm^2/cm$	Autres Conducteurs	ρ en $\Omega . cm^2/cm$
Argent	1,5	Carbone (graphite ou charbon de cornue) à 0° C	0,005 environ
Cuivre électrolytique	1,55		
Cuivre industriel	1,7 à 2		
Aluminium	2,6	**Électrolytes à 10° C Solutions à 10 %**	**ρ en $\Omega . cm^2/cm$**
Laiton (0,66 Cu, 0,34 Zn)	5,5		
Fer	9,5		
Plomb	20		
Maillechort (0,6 Cu, 0,25 Zn, 0,15 Ni)	30	SO_4H_2	2,5
Constantan (0,6 Cu, 0,4 Ni)	50	NaOH	3,2
Ferro-nickel (0,75 Fe, 0,25 Ni)	80	ClNa	8,5
Mercure	94	SO_4Cu	30
		SO_4Zn	30

Application.

Calcul de la résistance d'un conducteur à 0° en fonction de ses dimensions :

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (R \text{ ohms}, \quad \rho\ \Omega . cm^2/cm, \quad l \text{ cm}, \quad s \text{ cm}^2).$$

Exemple.

Calculer la résistance d'un conducteur d'aluminium de 200 m de longueur, section de diamètre $\frac{12}{10}$ mm, $\rho = 2,6\ \mu\Omega . cm^2/cm$ à une température voisine de 0°.

$$\rho = 2{,}6 \times 10^{-6}\ \Omega\,.\,\text{cm}^2/\text{cm},$$
$$l = 20\,000 \text{ cm} = 2 \times 10^4 \text{ cm},$$
$$s = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{3{,}14}{4} \times \frac{12}{100} \times \frac{12}{100} = 113 \times 10^{-4} \text{ cm}^2,$$
$$R = 2{,}6 \times 10^{-6} \times \frac{2 \times 10^4}{113 \times 10^{-4}} = \mathbf{4{,}6}\ \Omega.$$

3. — VARIATION DE LA RÉSISTIVITÉ AVEC LA TEMPÉRATURE

a. Métaux.

La résistivité ρ d'un conducteur métallique croît avec la température.

Dans les limites de température de service, ρ est presque une fonction linéaire de la température t:

$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$, ρ est la résistivité à t^o C, ρ_0 à 0° C,

α (*alpha*), coefficient de température, caractérise chaque matériau.

Pour le *cuivre* et l'*aluminium*, $\alpha = 0{,}004$, pour le *fer* $\alpha = 0{,}0055$.

Pour le *constantan*, alliage de cuivre et de nickel (0,6 Cu, 0,4 Ni), α est pratiquement nul: la résistivité du constantan est indépendante de la température.

b. Conducteurs non métalliques.

Ces corps, de grande résistivité, *ont un coefficient α négatif*: leur résistivité ρ est plus faible à chaud qu'à froid.

Pour *le carbone*, α est voisin de — 0,0007.

Conséquence.

Lorsqu'un conducteur subit de gros écarts de température (en régime normal un filament de lampe atteint 2 000°), la résistance, en service, peut être 8 à 10 fois la résistance à froid.

Pour les machines, la température peut varier de 40 à 60°, l'augmentation de résistivité et, par suite, de résistance est alors d'environ 16 à 25 %.

Remarque.

L'interprétation que nous avons donnée de la résistance est en accord avec les lois énoncées. En effet, les divers éléments de longueur d'un fil peuvent être considérés comme autant de résistances en série, donc R est proportionnelle à l.

L'augmentation de section donne, dans tout conducteur, un passage plus large. Un conducteur de section double peut être assimilé à deux conducteurs voisins, de même section en dérivation, offrant ainsi deux fois plus de passage au courant d'électrons.

La résistivité intervient comme facteur caractéristique de la matière (plus ou moins conductrice) et de sa température.

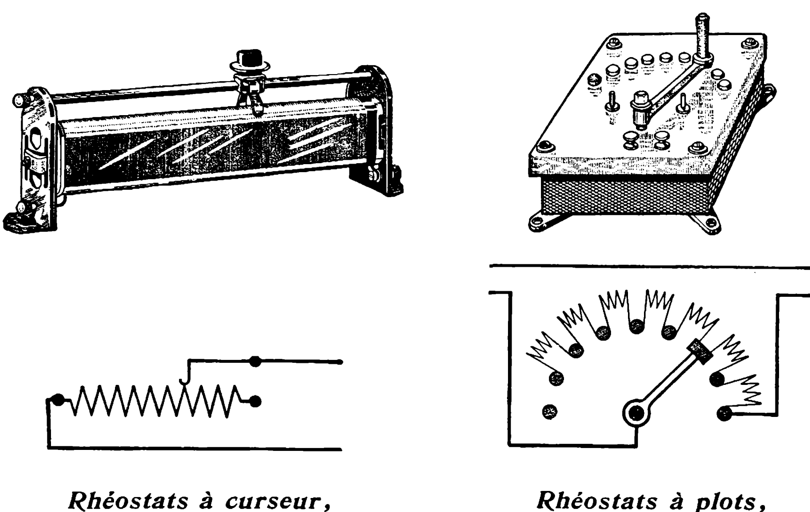
III. — APPLICATIONS

1. — CONNEXIONS

Dans les montages, on pourra souvent considérer comme négligeable devant les autres éléments du circuit la résistance des fils ou barres de connexion relativement courts, de section suffisante, de métal très bon conducteur (cuivre ou aluminium).

2. — RHÉOSTATS

Les rhéostats sont des résistances réglables, le plus souvent par modification de la longueur utile d'un conducteur.



Rhéostats à curseur,
surtout employés en laboratoire.

Rhéostats à plots,
type industriel.

Pour une différence de potentiel donnée U, toute variation de la résistance totale R du circuit entraîne une variation du courant I en sens inverse $\left(\text{loi d'Ohm } I = \frac{U}{R}\right)$.

Un rhéostat en série dans un circuit peut donc être utilisé pour le réglage du courant.

EXERCICES

1 — Calculer la résistance R d'un fil de cuivre de résistivité $\rho = 1,6\ \mu\Omega.cm^2/cm$ à O°C dont la longueur est 1 km et la section 1 mm².
En déduire la formule donnant pratiquement la résistance kilométrique R_K d'une ligne de cuivre en fonction de son diamètre D mm à la même température.

Réponses : $R = 16\ \Omega$; $R_K = \frac{20,4}{D^2}$.

2 — *a.* Évaluer la longueur l et la résistance R d'un fil de diamètre $d = 1$ mm que l'on peut tirer d'une masse $m = 1$ kg d'aluminium de densité $\delta = 2,6$, de résistivité $\rho = 2,6\ \mu\Omega.cm^2/cm$.
b. Établir les relations générales donnant l et R en fonction de m, d, δ et ρ pour un matériau quelconque.

Réponses : a. *490 m, 16 Ω ;* b. $l = \frac{4\ m}{\pi \delta d^2}$, $R = \frac{16\ m \rho}{\delta \pi^2 d^4}$ *où m est en grammes et* d *en centimètres.*

3 — Quelle est la longueur d'un fil de résistance 1 Ω, de section 1 mm² : *a.* en cuivre, $\rho = 1,6\ \mu\Omega.cm^2/cm$; *b.* en aluminium, $\rho = 2,6\ \mu\Omega.cm^2/cm$.
Réponses : a. *62,5 m ;* b. *38,4 m.*

4 — Un fer à repasser de 300 W est alimenté sous 125 V. Calculer :
a. le courant qui le traverse ;
b. l'énergie fournie en 15 minutes par le secteur, et son prix à 28 F le kWh ;
c. la longueur du ruban chauffant, sachant que sa section est rectangulaire de 2 mm de largeur et 0,2 mm d'épaisseur ; la résistivité dans les conditions de fonctionnement est 100 $\mu\Omega.cm^2/cm$. (C. A. P.)
Réponses : 2,4 A ; 75 Wh ; 2,1 F ; 20,8 m.

5 — Une ligne (deux fils) de 250 m de longueur relie un générateur à une installation qui reçoit une puissance de 3 kW sous la tension de 120 V. On admet une chute de tension en ligne de 5 % de la tension d'emploi. Calculer la résistance et la section de la ligne, en cuivre de résistivité $\rho = 1,6\ \mu\Omega.cm^2/cm$.
Réponses : $R = 0,24\ \Omega$; $s = 0,33\ cm^2$.

6 — Une lampe à filament métallique, marquée 120 V-40 W, a donné lieu à la mesure suivante : sous la tension de 2 V, elle est parcourue par un courant de 0,05 A et, dans ce cas, sa température reste voisine de la température ambiante 20° C. En fonctionnement normal, on admet que le filament est porté à la température de 2 000° C. Calculer la résistance à froid et à chaud du filament, ainsi que son coefficient moyen de température dans l'intervalle 20°-2000° C.
Réponses : 40 Ω : 360Ω ; 0,0044.

7 — Un réchaud marqué 120 V-600 W utilise, comme résistance chauffante, un fil de section circulaire de 0,8 mm de diamètre, de résistivité à O°C, 80 $\mu\Omega.cm^2/cm$ et de coefficient de température 0,002. En période de fonctionnement, cette résistance est portée à la température de 500° C. Calculer la longueur de fil utilisé.
Réponse : 7,50 m.

8 — Une ligne électrique doit satisfaire aux conditions suivantes : puissance au départ 10 kW, tension au départ 200 V, perte de puissance en ligne 5 % maximum, distance de transport 200 m, nature de la ligne 2 fils cuivre résistivité 1,8 $\mu\Omega.cm^2/cm$, densité 8,8. On demande la masse de cuivre à utiliser. (B. P. dessinateur.)
Réponse : 127 kg.

10. — Effet thermique du courant

I. — LOI DE JOULE

1. — ÉTUDE THÉORIQUE

a. Le *passage du courant* dans un conducteur s'accompagne d'un *dégagement de chaleur* (leçon 4).

b. Cette énergie thermique mise en jeu trouve son application dans les *appareils de chauffage et d'éclairage* : réchauds, fours, lampes à incandescence...

L'énergie électrique fournie à un récepteur quelconque a pour expression :

$$\mathbf{W} \text{ joules} = \mathbf{U} \text{ volts} \times \mathbf{I} \text{ ampères} \times t \text{ secondes (leçon 7)} \qquad (1)$$

c. La *loi d'Ohm* appliquée à un conducteur ou à un récepteur fournissant uniquement de l'énergie thermique (leçon 8) s'exprime par :

$$\mathbf{U} \text{ volts} = \mathbf{R} \text{ ohms} \times \mathbf{I} \text{ ampères} \qquad (2)$$

d. En tenant compte de ces deux relations, nous pouvons énoncer :

Loi de Joule :

L'énergie thermique* W *mise en jeu dans un conducteur de résistance* R, *parcouru par un courant constant* I, *pendant le temps* t, *est donnée par la relation



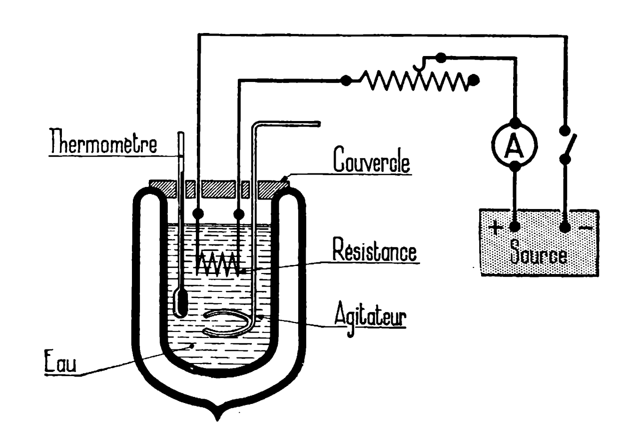
$$\boxed{\mathbf{W} = \mathbf{R}\mathbf{I}^2 t}$$

W joules, R ohms,
I ampères, t secondes.

2. — VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE

Montage.

La source est une batterie d'accumulateurs de 12 V, la résistance, en constantan $R_1 = 2\ \Omega$, plonge dans un calorimètre contenant environ 200 g d'eau pure, un rhéostat permet de faire varier le courant, un ampèremètre fournit sa mesure I.



Expériences.

a. ***Influence du temps* t.** Pour un courant constant $I_1 = 2$ A, on note régulièrement toutes les 2 mn une élévation de température de 1° :

l'énergie thermique W *est proportionnelle au temps t* de passage du courant.

b. ***Influence du courant I.*** A l'aide du rhéostat réglons le courant à la valeur $I_2 = 2\ I_1 = 4$ A ; l'élévation de température est de 4° pour 2 mn.

La résistance du rhéostat supprimée, le courant devient $I_3 = 3\ I_1 = 6$ A ; l'élévation de température est de 9° pour 2 mn :

l'énergie thermique W *est proportionnelle au carré du courant* (pour un temps et une résistance donnés).

c. ***Influence de la résistance R.*** Remplaçons la résistance R_1 :

1° par une résistance constante $R_2 = 2\ R_1 = 4\ \Omega$, le courant étant maintenu à la valeur $I_1 = 2$ A, l'élévation de température est de 2° pour 2 mn ;

2° par une résistance constante $R_3 = 3\ R_1 = 6\ \Omega$, le courant maintenu à la valeur $I_1 = 2$ A, l'élévation de température est de 3° pour 2 mn :
l'énergie thermique W *est proportionnelle à la résistance* R *du conducteur* (pour un courant et un temps donnés).

Conclusion.

L'énergie thermique W est proportionnelle au produit RI^2t.

Remarques.

La relation $I = \frac{U}{R}$, applicable à un *récepteur thermique*, permet d'écrire :

$$W = RI^2t = R\frac{U^2}{R^2}t = \frac{U^2}{R}t$$

— Sous cette forme la vérification de la loi se fera avec un voltmètre mis en dérivation aux bornes de la résistance R.

— Les réseaux distribuent l'énergie *à tension U constante, l'énergie W mise en jeu dans un appareil thermique est d'autant plus grande que sa résistance R est plus faible.*

3. — PUISSANCE DU RÉCEPTEUR THERMIQUE

a. Pour tout récepteur, l'expression de la puissance absorbée est :

$$\mathbf{P = \frac{W}{t} = UI}$$

b. Pour un récepteur thermique $P = \frac{W}{t} = \frac{RI^2t}{t} = RI^2$

ou $\mathbf{P = \frac{U^2t}{Rt} = \frac{U^2}{R}}$

P watts,
W joules,
I ampères,
R ohms,
t secondes.

— L'expression $P = \frac{U^2}{R}$ permet le calcul immédiat de la puissance mise en jeu dans un récepteur thermique de résistance R, utilisé à la tension U.

— La loi d'Ohm et ces expressions de la puissance thermique permettent le calcul direct de l'une quelconque des grandeurs P, I, U, R si l'on connaît deux d'entre elles.

Exemple.

P et I sont donnés : $U = \frac{P}{I}$, $R = \frac{P}{I^2}$;

U et R sont donnés : $I = \frac{U}{R}$, $P = \frac{U^2}{R}$.

Cas particulier. — Pour R = 1 Ω et I = 1 A P = 1 W.

Autre définition de l'ohm (légale avant le 14 janvier 1948) :

L'ohm est la résistance d'un conducteur dans lequel un courant de 1 A développe une puissance thermique de 1 W.

4. — INTERPRÉTATION DU PHÉNOMÈNE

La chaleur qui se manifeste dans un conducteur est due à l'agitation moléculaire provoquée par les électrons qui sautent d'un atome à un autre.

II. — CONSÉQUENCES DE L'EFFET THERMIQUE

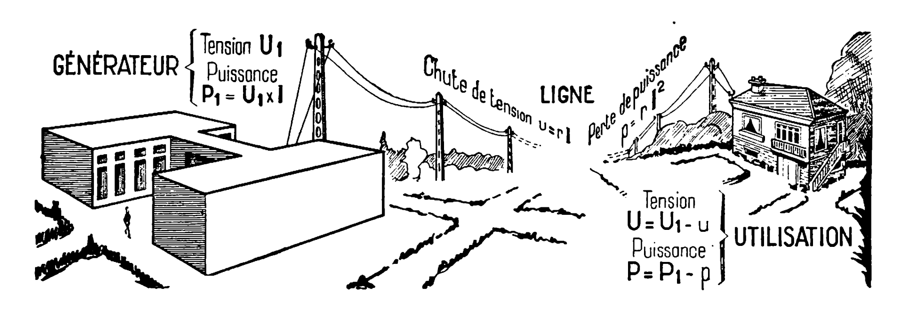
1. — EFFET UTILE

Ce phénomène est utilisé comme source de chaleur (chauffage, éclairage par incandescence).

2. — EFFET NUISIBLE

Dans d'autres cas : transport d'énergie, production de force motrice, électrochimie..., la chaleur, qui apparaît inévitablement avec le passage du courant, constitue un *gaspillage d'énergie préjudiciable au bon rendement de l'installation.*

Exemple.



Une petite ligne de résistance $r = 4\ \Omega$ relie une source à une installation, absorbant une puissance de 60 kW sous la tension $U = 3\ 000$ V

Le courant débité est $I = \frac{P}{U} = \frac{60\ 000}{3\ 000} = 20$ A

La chute de tension en ligne est $u = rI = 4 \times 20 = 80$ V

La perte de puissance en ligne est $p = r\,I^2 = 4 \times 20^2 = 1\ 600$ W

La puissance fournie par la source est $P_1 = P + p = 60\ 000 + 1\ 600 = 61\ 600$ W

La tension au départ de la ligne est $U_1 = U + u = 3\ 000 + 80 = 3\ 080$ V

Pour diminuer la perte de puissance en ligne il y a intérêt à diminuer r et I, mais, pour conserver la même puissance transportée P = UI, il faut augmenter U.

Les transports économiques d'énergie à grande distance se font sous des tensions élevées (quelques centaines de kilovolts) pour des courants de quelques centaines d'ampères.

3. — DENSITÉ DE COURANT

C'est le courant à travers l'unité de surface de la section du conducteur. En général, la densité de courant s'exprime en ampères par millimètre carré.

Pour éviter l'échauffement exagéré des conducteurs, entraînant la détérioration de l'isolant, des appuis et du conducteur lui-même (par fusion), on est amené à se fixer pour chaque conducteur, *suivant ses conditions d'emploi, une limite de densité de courant.*

Exemples.

Pour de faibles sections (1 ou 2 mm^2) de canalisations en cuivre, isolées au caoutchouc vulcanisé, si la chute de tension admissible n'impose pas une limite plus faible, on peut admettre comme limite supérieure 10 A/mm^2 (8 A/mm^2 pour les conducteurs d'aluminium de même section).

Ces limites dépendent de la section; par exemple on prendra comme limite supérieure 4 A/mm^2 pour une canalisation en cuivre, de 10 mm^2 de section, sous isolant caoutchouc-toile.

4. — COURT - CIRCUIT

C'est l'établissement, par contact, fortuit ou non, d'un circuit présentant une résistance négligeable entre deux points sous tension.

Le courant atteint instantanément une valeur I très importante.

La fusion des conducteurs peut se produire et la chaleur dégagée peut devenir la cause de détérioration ou d'incendie.

5. — COUPE - CIRCUIT FUSIBLE

C'est un appareil de sécurité, monté en série dans un circuit.

Il provoque la coupure du circuit, par fusion d'éléments conducteurs, dès que le courant I dépasse une valeur critique déterminée.

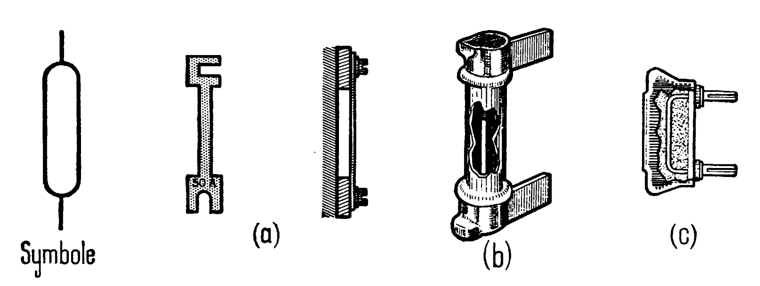
On utilise à cet effet *des éléments calibrés de fil ou bande métallique*, réalisés en alliage plomb-étain, aluminium ou argent.

Les réalisations sont de divers types :

a. à fil nu ou barette entre bornes de serrage ;

b. fusible fixé sur support isolant mobile (coupe-circuit à tabatière) ;

c. fusible noyé dans une poudre isolante, cartouche à broches ou à vis.



Ces appareils présentent des inconvénients : la rupture n'est pas instantanée, l'échauffement est progressif; d'autre part, le fonctionnement du coupe-circuit fusible dépend des conditions extérieures (température, ventilation).

Pour les canalisations de forte puissance, la protection est assurée par des *disjoncteurs*, appareils qui utilisent, en général, l'effet électromagnétique du courant.

EXERCICES

1 — Une bouilloire électrique a une résistance chauffante de 20 Ω et est utilisée sous la tension de 120 V. En supposant que toute la chaleur est utilisée pour échauffer l'eau qu'elle contient, en combien de temps peut-elle amener à l'ébullition 0,75 l d'eau prise à la température de 15° C ?

Réponse : 6 mn 10 s.

2 — On a vérifié la loi de Joule en connectant, aux bornes d'une batterie d'accumulateurs, une spirale de constantan immergée dans 600 g d'eau placée dans une bouteille isolante. On a obtenu, pour un courant I = 1,3 A, une élévation de température de 0,5 degré par minute. Calculer :

a. la résistance de la spirale utilisée ;

b. la longueur du fil de cette spirale (diamètre du fil 0,2 mm, résistivité du constantan 50 $\mu\Omega.cm^2/cm$) :

c. la tension aux bornes de la spirale ;

d. la longueur du fil de même nature permettant d'obtenir avec la même tension un échauffement quatre fois plus rapide que dans le cas précédent.

Réponses : $R = 12{,}4\ \Omega$; $l_1 = 78$ cm ; $U = 16{,}1$ V ; $l_2 = 19{,}5$ cm.

3 — Un réchaud électrique porte les indications 125 V-300 W, calculer sa résistance chauffante dans les conditions normales d'emploi. L'appareil est branché sur une prise de courant à la tension de 115 V ; on suppose que sa résistance électrique ne varie pas dans ces conditions. Calculer la nouvelle puissance du réchaud.

Réponses : 52 Ω ; 255 W.

II. — Propriétés des générateurs. Force électromotrice. Résistance

I. — FORCE ÉLECTROMOTRICE

1. — NOTION ÉLECTRONIQUE

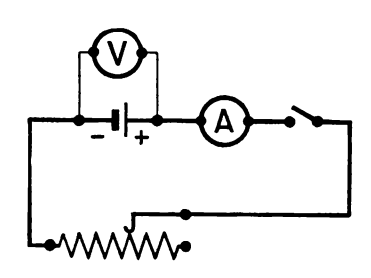
Un générateur (leçon 4) est un système capable de mettre les électrons en mouvement dans un circuit : il refoule les électrons à sa borne négative et les attire à sa borne positive.

Cette double action le caractérise :

la force qui fait mouvoir les électrons est appelée force électromotrice E du générateur.

Elle maintient entre les bornes du générateur une différence de potentiel.

2. — ÉTUDE EXPÉRIMENTALE D'UN GÉNÉRATEUR



a. **Montage.** — Nous disposons :

— *en série :* une pile sèche (type Leclanché), un rhéostat de réglage, un ampèremètre, un interrupteur ;

— *en dérivation aux bornes de la pile :* un voltmètre.

Dans les mesures suivantes, le circuit ne sera fermé que pendant le temps nécessaire aux lectures ; on laissera le circuit ouvert, entre deux mesures, pendant quelques minutes (une telle pile ne peut fonctionner à régime constant que pour des courants modérés et de courte durée).

b. **Résultats** pour des valeurs décroissantes de la résistance du rhéostat.

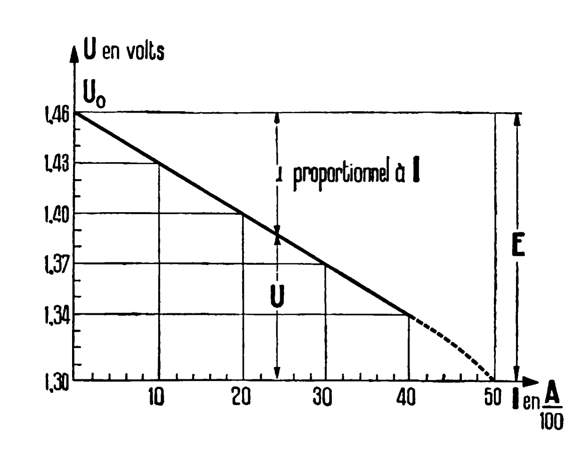
U AU VOLTMÈTRE	DIMINUTION u (par rapport à U_0)	I A L'AMPÈREMÈTRE
En circuit ouvert : $U_0 = 1{,}46$ V	0	0
En circuit fermé : $U_1 = 1{,}43$ V	0,03 V	0,1 A
— — $U_2 = 1{,}40$ V	0,06 V	0,2 A
— — $U_3 = 1{,}37$ V	0,09 V	0,3 A
— — $U_4 = 1{,}34$ V	0,12 V	0,4 A

3. — LOI D'OHM POUR UN GÉNÉRATEUR

Portons sur le graphique les valeurs correspondantes de U et de I.

La même tension, $U_0 = 1{,}46$ V, *se rétablit chaque fois que le circuit est ouvert, elle caractérise le générateur : c'est sa force électromotrice* E = 1,46 V.

En circuit fermé, la tension U, aux bornes de la pile, décroît d'une quantité u (0,03 ; 0,06...) proportionnelle au courant I (0,1 ; 0,2...).



Le quotient $\frac{u}{I}$, analogue à une résistance (loi d'Ohm), est ***la résistance intérieure r du générateur.***

On a, dans le cas étudié,

$$r = \frac{u}{I} = \frac{0{,}03}{0{,}1} = \frac{0{,}06}{0{,}2} = ... = 0{,}3\ \Omega$$

Pour chaque mesure, $U = E - u = E - rI$.

La relation $\boxed{\mathbf{U = E - rI}}$ ***est l'expression de la loi d'Ohm appliquée à un générateur.***

II. — FORCE ÉLECTROMOTRICE D'UN GÉNÉRATEUR

1. — EN CIRCUIT OUVERT

Aucun courant ne se manifeste, il y a équilibre entre la force électromotrice du générateur et la différence de potentiel qui tend à ramener les électrons, à travers le générateur, de la borne négative, où ils sont « en pression », à la borne positive, où ils sont « raréfiés ».

Force électromotrice E *et différence de potentiel* U_0 *à vide (en circuit ouvert), sont des grandeurs de même nature*, comme le sont en mécanique les forces action et réaction ; $E = U_0$.

La force électromotrice* E *d'un générateur a même valeur (exprimée en volts) que la différence de potentiel* U_0 *entre ses bornes en circuit ouvert.

2. — EN CIRCUIT FERMÉ

Le courant I s'établit et traverse le générateur où il dissipe en chaleur la puissance $p = rI^2$ (r résistance intérieure).

Dans le circuit extérieur, il met en jeu a puissance $P_1 = UI$.

La puissance électrique totale mise en jeu (principe de la conservation de la puissance) est $P = P_1 + p$, c'est-à-dire $P = UI + rI^2 = I(U + rI)$; soit, en tenant compte de la relation $U + rI = E$,

$$\boxed{P = EI}$$

On a donc $$E = \frac{P}{I} = \frac{Pt}{It} = \frac{W}{Q}$$

Seconde définition :

La force électromotrice* E *d'un générateur est la mesure de l'énergie cédée à chaque coulomb qui le traverse.

III. — RENDEMENT ÉLECTRIQUE D'UN GÉNÉRATEUR

1. — DÉFINITION

Ce rendement est le rapport :

$$\eta = \frac{\text{Puissance fournie au circuit extérieur}}{\text{Puissance totale mise en jeu}}$$

c'est-à-dire $$\eta = \frac{UI}{EI} = \frac{U}{E}$$

Le rendement électrique η dépend de la tension U, donc du courant I, c'est-à-dire du régime de fonctionnement du générateur.

2. — APPLICATION

Dans le cas de la pile étudiée :

Force électromotrice E = 1,46 V, résistance intérieure $r = 0,3\ \Omega$

Pour I = 0,1 A	U = 1,43 V	$\eta = \frac{1,43}{1,46} = 0,98$
Pour I = 0,2 A	U = 1,4 V	$\eta = \frac{1,4}{1,46} = 0,96$
Pour I = 0,4 A	U = 1,34 V	$\eta = \frac{1,34}{1,46} = 0,92$

Le rendement électrique décroît quand le courant débité augmente.

EXERCICES

1 — Un accumulateur présente, à ses bornes, la tension $U_0 = 2$ V en circuit ouvert et $U_1 = 1,99$ V quand il débite un courant de 2 A. Calculer la tension U aux bornes de cet accumulateur lorsqu'il débite un courant de 10 A.

Réponse : U = 1,95 V.

2 — Une pile de force électromotrice 1,5 V, de résistance 1 Ω, débite sur une résistance de 4 Ω.

Quelle est en µth la chaleur dégagée dans la résistance de 4 Ω en 20 minutes ? Quel est, dans ces conditions, le rendement de la pile ?

Réponses : 103,7 µth ; 0,8.

3 — Une batterie de piles de force électromotrice 4 V alimente un voltamètre (à anode soluble) contenant une solution de sulfate de cuivre, de résistance 6 Ω. Au bout de 16 minutes 5 secondes, on a pesé un dépôt de 0,16 g de cuivre à la cathode.

Calculer la puissance électrique totale mise en jeu et la résistance intérieure de la batterie de piles. Prendre masse atomique Cu = 64.

Réponses : 2 W ; 2 Ω.

4 — Une batterie de piles de force électromotrice 4,5 V alimente une résistance de 10 Ω. La puissance dissipée dans cette résistance est de 1 W. Quelle est la résistance intérieure de la batterie ?

Réponses : 4,25 Ω.

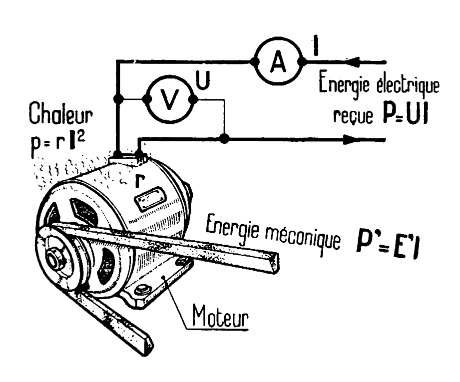
12. — Propriétés des récepteurs. Force contre-électromotrice. Résistance

I. — LOI D'OHM APPLIQUÉE A UN RÉCEPTEUR

1. — RÉSISTANCE

Nous avons vu que le passage du courant dans un conducteur s'accompagne toujours d'un dégagement, plus ou moins important, d'énergie thermique.

Tout récepteur, en tant que conducteur, obéit à cette loi générale.



De nombreux récepteurs restituent de l'énergie sous une autre forme, mécanique ou chimique, par exemple.

Considérons un tel récepteur, par exemple un moteur qui ne comprend qu'un seul circuit (appelé moteur série) dont la résistance totale à l'instant considéré est r.

Dans ce cas, r est la somme des résistances qui constituent le circuit du moteur.

2. — FORCE CONTRE-ÉLECTROMOTRICE

Faisons travailler ce moteur; alimenté sous la tension U volts, il absorbe le courant I ampères, la source de courant lui fournit la puissance $P = UI$.

Une partie p de cette puissance est transformée directement en chaleur dans la résistance r, telle que $p = rI^2$ (loi de Joule) ; le reste de cette puissance, soit P', est transformé en puissance mécanique. Le principe de la conservation de l'énergie (ou de la puissance) nous permet d'écrire :

$$P' = P - p \quad \text{c'est-à-dire} \quad P' = UI - rI^2 \qquad (1)$$

En une seconde, I coulombs qui fournissent P′ joules, sous forme d'énergie mécanique, subissent de ce fait une diminution de potentiel :

$$E' = \frac{P'}{I}, \text{ (leçon 7)} \qquad (2)$$

E′ est appelée force contre-électromotrice du récepteur.

Elle caractérise ce récepteur dans les conditions de travail considérées.

Sous la forme : $$E' = \frac{P'}{I} = \frac{P't}{It} = \frac{W'}{Q}$$

la force contre-électromotrice E′ mesure l'énergie transformée en travail mécanique par ce récepteur, pour chaque coulomb qui le traverse.

3. — EXPRESSION DE LA LOI

Les relations (1) et (2) du paragraphe précédent permettent d'écrire :

$$\boxed{E' = U - rI}$$

Cette relation est l'expression de la loi d'Ohm, appliquée à un *récepteur qui ne transforme pas directement en chaleur toute l'énergie qu'il reçoit.*

Exemple.

Un moteur série, de résistance $r = 4\ \Omega$, travaille dans les conditions suivantes : tension à ses bornes $U = 120$ V, courant absorbé $I = 8$ A

Il reçoit de la ligne une puissance électrique $P = UI = 120 \times 8 =$ **960 W**

Il dissipe sous forme de chaleur la puissance $p = rI^2 = 4 \times 8^2 =$ **256 W**

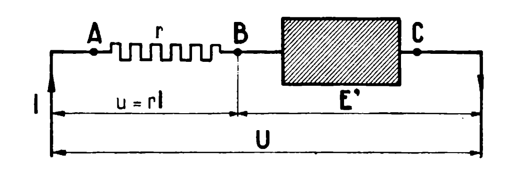
Il transforme en puissance mécanique $P' = 960\ \text{W} - 256\ \text{W} =$ **704 W**

Sa force contre-électromotrice est $E' = \frac{P'}{I} = \frac{704}{8} =$ **88 V**

Soit encore $E' = U - rI = 120 - 4 \times 8 =$ **88 V**

Remarques.

a. On peut, ***théoriquement***, remplacer un tel récepteur par deux appareils en série.



L'un est une résistance *r*, qui présente entre ses bornes A et B une différence de potentiel $u = r\text{I}$; l'autre appareil, entre B et C, sans résistance oppose une différence de potentiel E′ au passage du courant.

E′ s'oppose à l'action de U; pour cette raison, on appelle E′ force contre-électromotrice.

b. Tout récepteur qui ne transforme pas uniquement en chaleur toute l'énergie qu'il reçoit présente une force contre-électromotrice E′.

Pour prendre de l'énergie aux électrons il faut diminuer « leur pression », c'est-à-dire opposer E′ à la tension d'alimentation U.

c. Tout récepteur qui transforme en chaleur toute l'énergie qu'il reçoit ne présente pas de force contre-électromotrice : $\text{E}' = 0$; on retrouve la loi d'Ohm sous la forme $0 = \text{U} - r\text{I}$.

II. — RENDEMENT ÉLECTRIQUE D'UN RÉCEPTEUR

Ce rendement est défini par le rapport :

$$\eta = \frac{\textbf{Puissance utile restituée par le récepteur}}{\textbf{Puissance fournie au récepteur par la source}}$$

c'est-à-dire :

$$\eta = \frac{\text{P}'}{\text{P}} = \frac{\text{E}'\text{I}}{\text{UI}} = \frac{\text{E}'}{\text{U}}$$

dans le cas présent la puissance utile est restituée sous forme mécanique.

Exemple.

Pour les données numériques envisagées plus haut :

$$\eta = \frac{88}{120} = 0{,}73$$

Cas particulier.

Pour un récepteur uniquement thermique, un radiateur par exemple (voir leçon 2, page 10), toute l'énergie électrique reçue est transformée en chaleur qui est ici l'énergie utile. Le rendement électrique η est égal à l'unité.

Remarque.

Pour les récepteurs fournissant de l'énergie mécanique, c'est le cas des moteurs, une partie p_1 de la puissance mécanique P′ est absorbée par les frottements.

La puissance mécanique utilisable, disponible sur l'arbre du moteur, est alors $P' - p_1$;

le rendement pratique de ce récepteur est alors $\eta = \frac{P' - p_1}{P}$.

En première approximation, on néglige souvent p_1.

EXERCICES

1 — Un voltamètre à électrodes inattaquables contient une solution sulfurique.

a. Alimenté à la tension de 6 V, on a recueilli 179 cm³ d'hydrogène (volume mesuré dans les conditions normales) au bout de 16 minutes 5 secondes.

b. Alimenté à la tension de 4 V, on a recueilli 89,6 cm³ d'hydrogène (mesuré dans les conditions normales) au bout du même temps.

Calculer la force contre-électromotrice *e* et la résistance *r* de ce voltamètre.

Réponses : e = *2 V ;* r = *2,5* Ω.

2 — Pendant le fonctionnement d'une cuve à électrolyse, on a mesuré l'intensité du courant $I_1 = 6$ A et la tension aux bornes $U_1 = 2,7$ V. On a modifié le circuit, ce qui a permis de reprendre les mesures suivantes : $I_2 = 4$ A et $U_2 = 2,3$ V. Une nouvelle modification du circuit a été trop brève pour permettre de lire sûrement l'intensité, on n'a pu noter que $U_3 = 3,9$ V. Calculer le courant I_3 qui a traversé le voltamètre dans la dernière partie de l'expérience. (C. A. P.)

On déterminera les caractéristiques électriques E′ et *r′* du voltamètre.

Réponses : E′ = 1,5 V ; r′ = *0,2* Ω*; I_3 = 12 A.*

3 — Connectée aux bornes d'un moteur série, axe bloqué, une batterie d'accumulateurs de 6 V, de résistance négligeable, fournit un courant $I_1 = 3$ A.

En régime normal, à la vitesse de 1 200 tours par minute, ce moteur absorbe une puissance de 1 200 W sous la tension de 120 V.

a. Calculer : la résistance de ce moteur, sa force contre-électromotrice en régime normal, la puissance qu'il dissipe par effet Joule.

b. Sachant que les autres pertes (divers frottements) sont égales à celles par effet Joule, calculer la puissance mécanique disponible sur l'arbre et le couple moteur.

Réponses : a. r′ = *2* Ω*; E′ = 100 V ;* p = *200 W ;* b. *800 W ; C = 6,4 m.N.*

4 — Un moteur série a une puissance de 1 600 W, il est alimenté sous la tension de 125 V ; en ne tenant compte que des pertes par effet Joule, son rendement est 0,8.

a. Calculer, dans ces conditions : le courant I absorbé, la force contre-électromotrice E′, la résistance *r′* de ce moteur.

b. Au démarrage, E′ est nulle; quelle est la résistance du rhéostat à employer (rhéostat de démarrage) si, à ce moment, on admet comme limite du courant absorbé 1,5 × I. Sans ce rhéostat, quel serait le courant absorbé ?

Réponses : a. *16 A ; 100 V ; 1,57* Ω *;* b. *3,64* Ω *; 79,7 A.*

5 — Le moteur d'un appareil ménager est enfermé dans un coffre étanche. La puissance utile est 0,25 ch pour un courant de 2,6 A sous la tension de 125 V. On demande :

a. le rendement du moteur ;

b. la quantité de chaleur dégagée dans le coffre après 15 mn de fonctionnement du moteur. (C. A. P.)

Réponses : 0,57 ; 30,2 mth.

13. — Loi d'Ohm généralisée. Lois de Kirchhoff

I. — ÉTUDE D'UN CIRCUIT FERMÉ

1. — PUISSANCES

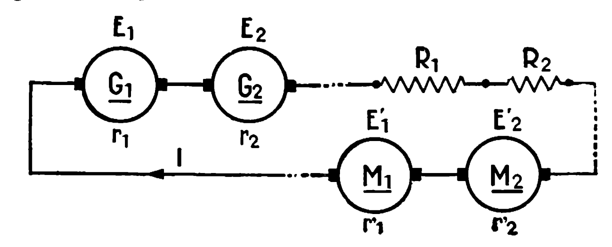
Considérons un circuit fermé, parcouru par un courant I, et comprenant :

— *des générateurs* G_1, G_2, ..., qui ont respectivement
les forces électromotrices E_1, E_2,...,
et les résistances intérieures r_1, r_2,... ;

— *des récepteurs :*

a. uniquement thermiques, résistances R_1, R_2,...

b. quelconques M_1, M_2,..., qui présentent :
les forces contre-électromotrices E_1', E_2',...,
et les résistances intérieures r_1', r_2'...



Appliquons à ce circuit *le principe de la conservation de la puissance:*

Puissance mise en jeu par les générateurs.				
$E_1I + E_2I + ... =$	Puissance dissipée en chaleur	$R_1I^2 + R_2I^2 + ...$	dans les résistances R_1, R_2,
		$r_1I^2 + r_2I^2 + ...$	dans les générateurs,
		$r_1'I^2 + r_2'I^2 + ...$	dans les récepteurs M_1, M_2.
	+		
	Puissance transformée sous forme non thermique.	$E_1'I + E_2'I + ...$	dans les récepteurs M_1, M_2.

Ce tableau constitue le *bilan des puissances* mises en jeu dans le circuit.

2. — TENSIONS

Divisons par I les deux membres de la relation précédente, nous obtenons :

$$E_1 + E_2 + ... = E_1' + E_2' + ... + R_1I + R_2I + ... + r_1I + r_2I + ... + r_1'I + r_2'I + ...$$

Cette relation est le *bilan des tensions*, elle montre les variations de potentiel (état énergétique) de chaque coulomb, le long du circuit.

En traversant un générateur, chaque coulomb acquiert de l'énergie ; son potentiel s'élève de E volts.

En traversant un récepteur, chaque coulomb cède de l'énergie ; son potentiel décroît :

a. de RI *(ou* rI, *ou* $r'I$*) volts* dans les résistances où il produit de l'énergie thermique ;

b. de E′ *volts* dans un récepteur où il produit de l'énergie non thermique, soit mécanique, soit chimique.

Rappel.

Il faut remarquer que le générateur lui-même, par sa résistance r, joue le rôle de récepteur dissipant la puissance thermique rI^2 watts, et abaisse de ce fait le potentiel de chaque coulomb de rI volts (leçon 11).

3. — EXPRESSION DE LA LOI

a. Pour simplifier l'écriture, on emploie le symbole Σ (1) (*sigma*), et on écrit :

$$\Sigma E = \Sigma E' + \Sigma RI + \Sigma rI + \Sigma r'I$$

Le courant I étant le même tout le long du circuit, on a :

$$\boxed{\Sigma E - \Sigma E' = I \times \Sigma (R, r, r')}$$

Cette relation traduit la loi d'Ohm pour le circuit fermé.

(1) Qui signifie : Somme de tous les termes tels que...

b. Pour le calcul du courant I, elle devient $I = \dfrac{\Sigma E - \Sigma E'}{\Sigma(R, r, r')}$,

ou, plus simplement

$$\boxed{\mathbf{I = \dfrac{\Sigma E}{\Sigma R}}}$$

Sous cette dernière forme, on affecte, dans le symbole ΣE :

le signe + aux forces électromotrices ;
le signe — aux forces contre-électromotrices.

ΣE est alors une *somme algébrique.*

ΣR est la *somme arithmétique de toutes les résistances du circuit.*

4. — APPLICATION NUMÉRIQUE

Un générateur de force électromotrice E = 120 V, de résistance r = 2 Ω, alimente un circuit comprenant en série :

— un moteur série de force contre-électromotrice E′ = 80 V, de résistance r' = 3 Ω :
— un rhéostat de résistance R = 15 Ω.

a. **Le courant** qui parcourt le circuit est $I = \dfrac{120 - 80}{15 + 2 + 3} = 2$ A.

b. **Bilan des puissances :**

Développée par le générateur
$P = EI = 120 \times 2 = \mathbf{240\ W}$

Transformée en puissance mécanique (moteur) :
$P' = E'I = 80 \times 2 = \mathbf{160\ W}$

Transformée en puissance thermique :

dans le générateur	$p_1 = rI^2$ =	2 × 4 =	**8 W**
dans le moteur	$p_2 = r'I^2$ =	3 × 4 =	**12 W**
dans le rhéostat	$p_3 = RI^2$ =	15 × 4 =	**60 W**
		Total =	**240 W**

c. **Bilan des tensions :**

Élévation de potentiel
dans le générateur E = **120 V**

Diminutions de potentiel :

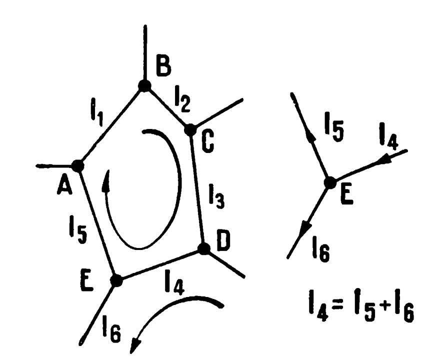
dans le générateur	rI = 2 × 2 =	**4 V**
dans le moteur	$E' + r'I$ = 80 + 3 × 2 =	**86 V**
dans le rhéostat	RI = 15 × 2 =	**30 V**
	Total =	**120 V**

II. — APPLICATION : LOIS DE KIRCHHOFF (1)

1. — LOI DES MAILLES

Soit un circuit complexe comportant des mailles fermées telles que ABCDEA ; dans chaque branche, il peut y avoir des générateurs et des récepteurs quelconques.

Partons d'un point arbitraire, sur la maille ; parcourons-la dans un sens arbitraire, celui de la flèche par exemple, et notons, pour chaque portion de parcours, les élévations et les diminutions de potentiel que subit chaque coulomb effectuant ce trajet.



Revenus au point de départ, nous pouvons écrire que la somme algébrique des augmentations de potentiel (comptées positivement) et des diminutions de potentiel (comptées négativement) est nulle pour tout le trajet considéré.

En effet, revenus au même point, nous devons y retrouver le même potentiel (c'est-à-dire le même état énergétique).

2. — LOI DES SOMMETS OU DES NŒUDS

La somme des courants qui arrivent à un sommet est égale à la somme des courants qui en partent.

Cette loi exprime le principe de la conservation de l'électricité.

3. — APPLICATION

Ces règles conduisent à un système d'équations qui permet de calculer des inconnues, par exemple, les courants I_1, I_2, I_3, ... dans les diverses branches d'un circuit comprenant des générateurs et des récepteurs de polarités connues.

Pour chaque élément d'une maille nous considérons *a priori* que le courant est dans le sens arbitraire de parcours choisi.

Nous compterons positivement toute force électromotrice E (ou contre-électromotrice E') qui provoquerait le passage du courant dans ce sens, et négativement E ou E' qui s'y oppose.

La résolution algébrique du système fournit les solutions I_1, I_2, ...

Toute solution I positive indique que le courant passe effectivement dans le sens arbitrairement choisi.

Toute solution I négative indique que ce courant passe en sens inverse du sens choisi.

---

(1) Kirchhoff : physicien allemand (1824-1887).

Exemples.

Association en parallèle de deux batteries d'accumulateurs et d'une résistance :

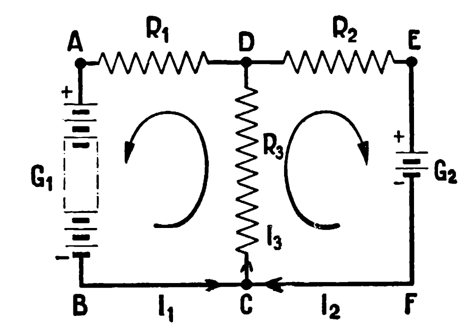
1° G_1, batterie de force électromotrice $E_1 = 20$ V, de résistance négligeable, en série avec $R_1 = 1\ \Omega$;

2° G_2, batterie de force électromotrice $E_2 = 4$ V, de résistance négligeable, en série avec $R_2 = 2\ \Omega$;

3° $R_3 = 14\ \Omega$ est en parallèle avec ces deux batteries.

(La polarité des batteries est précisée sur la figure.)

Déterminer les courants respectifs I_1, I_2, I_3 dans les trois branches.



Solution. — Adoptons dans les mailles ABCDA et DEFCD les sens arbitraires de parcours indiqués sur la figure.

1° **Maille ABCDA :**

— Élément AB, un coulomb traversant G_1 dans ce sens (dans lequel ce générateur entraîne les électrons) subit une élévation de potentiel $E_1 = 20$ V ;

— Élément BC, le courant I_1 parcourt une résistance négligeable (connexion), aucune variation de potentiel ;

— Élément CD, I_3 parcourt R_3 ; diminution de potentiel : I_3R_3 ;

— Élément DA, I_1 parcourt R_1 ; diminution de potentiel : I_1R_1.

Pour cette maille, $E_1 - I_3R_3 - I_1R_1 = 0$, c'est-à-dire $\mathit{20} - \mathit{14}\ I_3 - \mathit{1}\ I_1 = \mathit{0}$.

2° **Maille DEFCD :**

— Élément DE, I_2 parcourt R_2 ; diminution de potentiel : I_2R_2 ;

— Élément EF, I_2 traverse G_2 (dans le même sens où ce générateur entraîne les électrons), élévation de potentiel $E_2 = 4$ V ;

— Élément FC, I_2 traverse une résistance négligeable, aucune variation de potentiel ;

— Élément CD, I_3 parcourt R_3, diminution de potentiel : I_3R_3.

Pour cette maille, $E_2 - I_2R_2 - I_3R_3 = 0$, c'est-à-dire $\mathit{4} - \mathit{2}\ I_2 - \mathit{14}\ I_3 = \mathit{0}$.

3° **Sommet C,** $I_1 + I_2$ (arrivent en C) $= I_3$ (part de C).

Nous obtenons le **système d'équations** :

$$\begin{cases} 20 = I_1 + 14\ I_3, & (1) \\ 4 = 2\ I_2 + 14\ I_3, & (2) \\ I_3 = I_1 + I_2, & (3) \end{cases}$$

La solution de ce système est $I_1 = 6$ A, $I_2 = -5$ A, $I_3 = 1$ A.

Interprétation.

Les courants I_1 et I_3, de valeur positive, passent effectivement dans le sens de parcours adopté.

Le courant I_2, de valeur négative, passe en sens contraire du sens arbitraire adopté.

La batterie G_1 débite du courant, à la fois dans la branche CD et dans la branche CFED à travers G_2, qui devient récepteur et oppose la force contre-électromotrice E_2 au passage du courant I_2.

EXERCICES

1 — Une pile constituée de trois éléments en série, présentant chacun une force électromotrice de 1,5 V et une résistance de 0,5 Ω, alimente un voltamètre à eau acidulée présentant une force contre-électromotrice de 1,5 V et une résistance de 0,3 Ω.

a. Pour obtenir un courant constant de 0,2 A, quelle résistance x faut-il intercaler en série dans ce circuit ?

b. Quel est le volume d'hydrogène recueilli à la cathode du voltamètre au bout de 1/2 heure ? (Volume mesuré dans les conditions normales.)

Réponses : x = *13,2 Ω ;* v = *42 cm³.*

2 — On monte en série, en réunissant par deux fils identiques en maillechort (longueur 50 cm, section 0,1 mm², résistivité 30 μΩ. cm²/cm), deux générateurs : P_1 de force électromotrice $E_1 = 10{,}5$ V, de résistance $r_1 = 0{,}5\ \Omega$, et P_2 de force électromotrice $E_2 = 1{,}5$ V, de résistance $r_2 = 0{,}5\ \Omega$.

a. Calculer la tension aux bornes de chaque générateur.

b. Si l'on réunissait directement les bornes de P_2 (toujours placé dans ce montage) par un fil conducteur, quel courant passerait dans ce conducteur ?

Réponses : a. $U_1 = 9$ *V ;* $U_2 = 0$ *;* b. *Aucun courant ne traverse le conducteur connecté aux bornes de* P_2.

3 — Une batterie d'accumulateurs de 40 éléments (chacun présente avec ses connexions une résistance de 0,01 Ω et une force électromotrice variant de 1,8 à 2,2 V au cours de la charge) est chargée par un générateur de force électromotrice 97 V et de résistance 0,8 Ω.

Entre quelles limites, du début à la fin de la charge, doit varier une résistance de réglage en série avec la batterie pour maintenir le courant de charge à une valeur voisine de 6 A ?

Réponse : de 3 Ω à 0,3 Ω (environ).

4 — On constitue un générateur en associant en parallèle deux piles P_1 et P_2 (la borne + du générateur est formée par l'ensemble des bornes + des piles, la borne — du générateur est formée par les bornes — des piles).

P_1 est définie par sa force électromotrice 1,5 V et sa résistance 1 Ω,

P_2 par sa force électromotrice 1,8 V et sa résistance 0,5 Ω.

a. Ce générateur alimente une résistance R = 2 Ω, calculer le courant qui traverse R et le débit de chaque pile.

b. La résistance R est débranchée, que se passe-t-il à l'intérieur du générateur ?

Réponses : a. *0,73 A ;* P_1 *: 0,043 A ;* P_2 *: 0,685 A ;* b. P_2 *débite à travers* P_1 *: 0,2 A.*

5 — Une génératrice de résistance 2 Ω entretient à ses bornes une tension de 120 V Elle débite sur une ligne (deux fils) de cuivre de longueur 120 m, de section 2 mm de diamètre, alimentant un moteur de force contre-électromotrice 80 V, de résistance 2,8 Ω. La résistivité du cuivre est 1,6 μΩ. cm²/cm. Déterminer :

a. le courant dans la ligne ;

b. la tension aux bornes du moteur ;

c. la chute de tension en ligne ;

d. la force électromotrice de la génératrice ;

e. le rendement électrique de la génératrice et celui du **moteur.**

Faire le bilan des puissances de cette installation.

Réponses : 10 A ; 108 V ; 12 V ; 140 V ; 0,85 ; 0,74.

14. — Piles et accumulateurs hydro-électriques

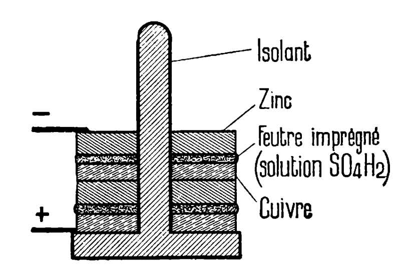
I. — PILES CHIMIQUES

1. — DÉFINITION

Une pile chimique est un dispositif permettant de transformer en énergie électrique une partie de l'énergie chimique potentielle du système de corps qui constitue ce générateur.

Une pile chimique comporte, au moins, un électrolyte et deux électrodes conductrices de natures différentes.

Ces électrodes portent respectivement les bornes négative et positive de la pile.



La première pile a été réalisée par Volta [1] en 1799, elle était constituée par un *empilage* de rondelles de zinc, de cuivre et de feutre imprégné d'une solution sulfurique étendue, d'où le nom de pile donné à cet appareil.

Dans de nombreuses piles, l'électrode négative prend part directement aux réactions chimiques, et cette électrode est souvent du zinc.

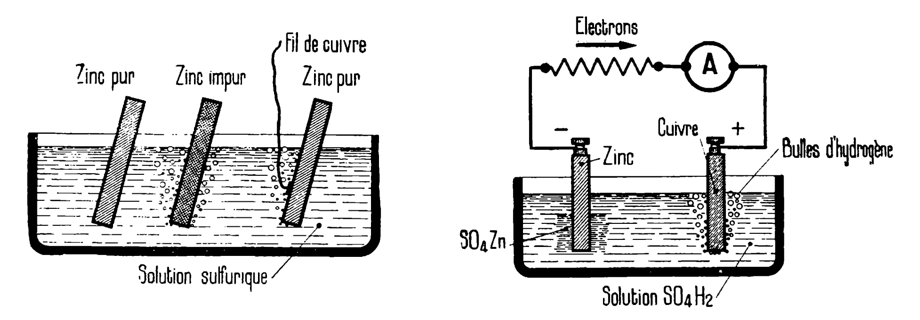
2. — EXPÉRIENCES

a. Dans une solution sulfurique étendue, plongeons une lame de zinc ordinaire, impur. *Le zinc est attaqué* et de l'hydrogène se dégage sur le zinc, suivant la réaction $SO_4H_2 + Zn \rightarrow SO_4Zn + H_2 \nearrow + 38$ mth.

b. Si le zinc est pur ou amalgamé superficiellement (frotté avec du mercure), quelques fines bulles d'hydrogène apparaissent et la *réaction s'arrête.*

(1) Volta : physicien italien (1745-1827).

c. Si l'on met du *cuivre au contact du zinc* pur ou amalgamé, la *réaction reprend* et l'hydrogène apparaît encore sur le zinc.



d. Réunissons maintenant la plaque de zinc et une plaque de cuivre par un fil métallique et plongeons ces plaques dans la solution sulfurique:

— *le zinc se dissout* peu à peu dans l'acide sulfurique étendu ;

— *de l'hydrogène apparaît* cette fois sur la plaque de cuivre ;

— *le fil extérieur qui réunit les deux plaques est parcouru par un courant temporaire*, décelable par un ampèremètre.

Le zinc, la solution acide et le cuivre constituent une pile chimique.

3. — INTERPRÉTATION DU PHÉNOMÈNE

Nous avons signalé dans l'étude de l'électrolyse la dissociation en ions de la molécule d'électrolyte.

1° Dans le cas étudié, des molécules d'acide sulfurique sont dissociées dans la solution :

SO_4H_2 ↗ anion SO_4^{--} (chargé de 2 électrons),
↘ 2 cathions H^+ (2 atomes d'hydrogène ayant perdu chacun 1 électron),

l'anion SO_4^{--} se combine au zinc.

$SO_4^{--} + Zn \rightarrow SO_4Zn$ (molécule neutre) + 2 électrons.

Le zinc s'électrise donc négativement.

2° Si le zinc pur (ou amalgamé) est seul dans la solution, il repousse alors les anions négatifs SO_4^{--} et la réaction s'arrête.

3° Si la plaque de zinc est réunie par un fil conducteur à une plaque de cuivre baignant aussi dans l'électrolyte, **les électrons suivent le conducteur** et se répandent sur le cuivre, où ils neutralisent les 2 cathions H^+ de la solution ;

$2\ H^+ + 2$ électrons $\rightarrow H_2 \nearrow$ (molécule neutre d'hydrogène, qui se dégage).

Il s'établit dans le circuit extérieur, du zinc vers le cuivre, un courant d'électrons, c'est-à-dire un courant électrique.

L'électrode de zinc constitue la borne — et l'électrode de cuivre la borne +.

4° Dans le cas du zinc impur, les impuretés créent de petites piles locales.

4. — FORCE ÉLECTROMOTRICE

En circuit ouvert, la borne zinc reste chargée négativement et la borne cuivre chargée positivement. Un voltmètre, branché entre ces deux bornes, mesure la différence de potentiel à vide, c'est-à-dire la force électromotrice E de cette pile.

Dans le cas envisagé, cette force électromotrice est voisine de 1 V.

La force électromotrice d'un élément de pile varie avec la nature chimique de la chaîne : électrodes, électrolyte.

5. — POLARISATION

En circuit fermé, cette pile ne peut débiter que pendant un temps assez court (quelques minutes si le circuit extérieur est peu résistant).

Cet arrêt du courant est dû au ***phénomène de polarisation.***

a. Il y a *eu modification dans la chaîne des éléments intérieurs de la pile* ; ils étaient initialement : zinc, électrolyte, cuivre ; ils sont devenus : zinc, électrolyte, hydrogène et cuivre.

b. La gaine d'hydrogène moléculaire isole électriquement l'électrode de cuivre.

6. — DÉPOLARISATION

Pour obtenir un débit continu, avec une pile, il faut éliminer l'hydrogène qui tend à s'accumuler autour de l'électrode positive. On utilise à cette fin des dépolarisants oxydants qui réalisent la transformation : $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$.

Les dépolarisants utilisés sont :

— ***solides*** (bioxyde de manganèse MnO_2) ;
— ***liquides*** (acide nitrique NO_3H, bichromate de potassium $Cr_2O_7K_2$) ;
— ou ***même gazeux*** (oxygène de l'air).

La dépolarisation par les liquides est plus rapide ; elle permet des débits importants plus constants.

7. — CAPACITÉ D'UNE PILE

C'est la quantité totale d'électricité qu'elle peut débiter jusqu'à épuisement complet.

La capacité d'une pile se mesure en ampères-heures ; elle dépend du régime de fonctionnement.

Si la capacité n'est pas limitée par le dépolarisant, ni par l'électrolyte, mis tous deux en quantité suffisante, *la quantité d'électricité que peut débiter la pile est fonction de la masse de l'électrode négative* (qui se dissout).

Dans ce cas, nous pouvons calculer cette capacité en utilisant *la formule de Faraday* applicable au phénomène d'électrolyse : 96 500 coulombs par valence gramme $\left(\frac{a}{n} \text{ grammes}\right)$ d'électrode négative.

Exemple.

Pour un débit très faible on peut obtenir, par kilogramme de zinc consommé :

$$96\,500 \times \frac{1\,000}{\left(\frac{65}{2}\right)} \times \frac{1}{3\,600} \text{ Ah} \qquad \text{soit environ 800 Ah.}$$

8. — ÉNERGIE UTILISABLE

Tout se passe, pour le circuit extérieur, comme si les électrons terminaient leur circuit en traversant la pile.

La pile présente une résistance apparente : *résistance intérieure* r de ce générateur. En cours de fonctionnement, l'énergie produite, transformée de l'énergie chimique, se décompose en :

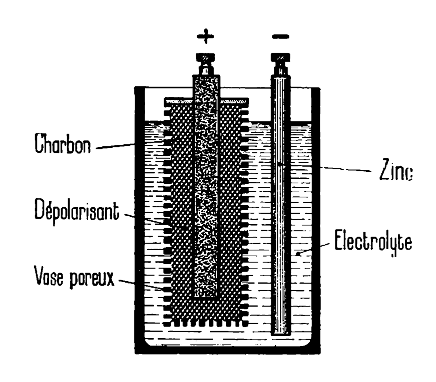
$w = rI^2t$ *énergie dissipée sous forme thermique dans le générateur ;*

$W = UIt$ *(en régime constant), énergie utilisable dans le circuit extérieur.*

9. — DIVERS TYPES DE PILES

a. Piles à dépolarisant.

Pile Leclanché (1868).



— *Électrolyte*, solution aqueuse à 20 % de sel ammoniac $ClNH_4$.

— *Électrode négative*, zinc amalgamé (par action de chlorure mercurique).

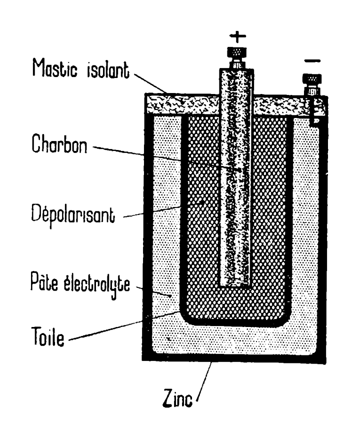
— *Électrode positive*, charbon de cornue et graphite agglomérés.

— *Dépolarisant*, bioxyde de manganèse en poudre mélangé à du charbon et maintenu autour de l'électrode positive par un vase poreux, un sac ou un liant (résine).

La force électromotrice de cette pile varie de 1,4 à 1,6 V, sa résistance dépend des dimensions (de l'ordre de quelques ohms).

La dépolarisation est lente, la pile ne fonctionne bien qu'en *régime intermittent* (pile des anciennes sonneries).

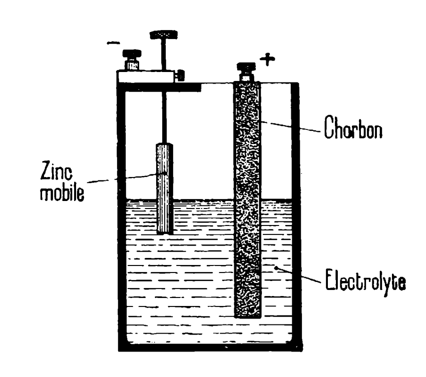
Pile sèche.



Cette pile est, en général, du type Leclanché à *liquide immobilisé* dans une pâte neutre (agar-agar, amidon, sciure...). Le vase en zinc amalgamé sert d'électrode négative ; le dépolarisant est en sac autour de l'électrode (positive) de charbon.

Force électromotrice : voisine de 1,5 V ; résistance d'environ 0,3 Ω par élément de petite dimension. L'emploi des piles sèches est très répandu (lampes et postes de radio portatifs).

Pile au bichromate.



— *Électrolyte et dépolarisant :* solution sulfurique au 1/10, additionnée de bichromate de potassium (100 g par litre).

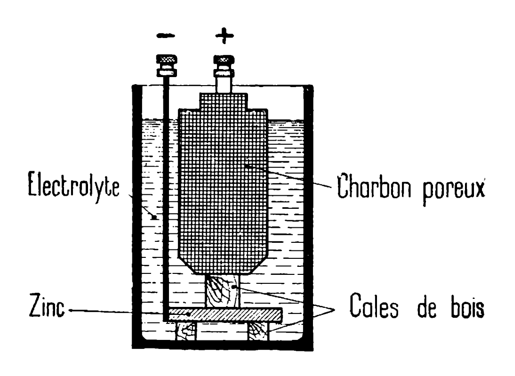
— *Électrode positive :* charbon de cornue et graphite.

— *Électrode négative :* zinc (il faut soulever le zinc hors de l'électrolyte quand la pile est au repos).

La force électromotrice de cette pile est voisine de 2 V, sa résistance intérieure est faible (quelques 1/10 Ω suivant dimensions).

Cette pile est susceptible de débits importants et continus (plusieurs ampères).

Piles Féry, à dépolarisation par l'air atmosphérique.



1er type. *Électrolyte :* solution aqueuse de sel ammoniac (environ 200 g par litre).

— *Électrode négative :* une plaque de zinc amalgamé placée au fond du vase.

— *Électrode positive : catalyseur de dépolarisation*, un bloc de charbon poreux de grande surface, partiellement immergé dans l'électrolyte.

La force électromotrice de cette pile est voisine de 1,25 V, sa résistance est de quelques ohms (pour un récipient de 1 l environ).

2e type. *Électrolyte :* solution aqueuse de soude ou de potasse, même nature et même disposition des électrodes que dans le cas précédent (l'électrolyte doit être séparé de l'atmosphère par une mince couche d'huile pour éviter la formation de carbonate au contact du gaz carbonique atmosphérique).

La force électromotrice de cette pile est voisine de 1,25 V, sa résistance intérieure quelques ohms (pour un récipient de 1 l). Ce type de pile est utilisé pour l'alimentation de circuits de signalisation.

b. Piles impolarisables.

Ces piles ont des électrolytes salins ne donnant pas lieu à un dégagement d'hydrogène. Elles peuvent être utilisées comme étalons.

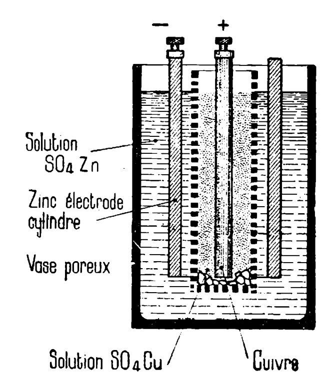
Pile Daniell (1836).

La pile Daniell comporte deux électrolytes :

— une solution de sulfate de zinc autour du zinc, électrode négative ;

— une solution saturée de sulfate de cuivre, dans un vase poreux, autour du cuivre, électrode positive.

Cette pile a une force électromotrice pratiquement constante 1,08 V à 20°, sa résistance est de 5 à 10 Ω (suivant dimensions).



Pile Weston.

Elle est constituée par la chaîne suivante : mercure (électrode +), sulfate de mercure, sulfate de cadmium, amalgame de cadmium (électrode —).

On admet pour les besoins industriels que la force électromotrice de cette pile est 1,0183 V à la température de 20° C (Loi du 14 janvier 1948).

Remarque.

Certaines piles modernes utilisent le magnésium comme électrode négative, ce qui diminue leur masse. (Au repos, le magnésium doit être séparé de l'électrolyte.)

On met au point actuellement des piles au magnésium dont l'électrolyte serait de l'eau de mer. Ces piles conviennent particulièrement aux batteries d'alimentation des postes de radio pour naufragés (légèreté et remplissage au moment de l'emploi).

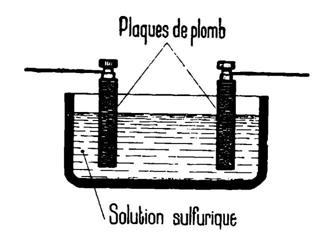
Le développement des appareils portatifs de transmission (radio, téléphone militaire) et d'éclairage a donné une grande impulsion à l'industrie des piles et à la recherche de types nouveaux.

II. — ACCUMULATEURS ÉLECTRIQUES

I. — PRINCIPE

Les accumulateurs électriques permettent de réaliser les deux transformations

énergie électrique ⇄ énergie chimique.



Cas de l'accumulateur au plomb : le physicien Planté, en 1860, a utilisé un voltamètre à électrodes de plomb et une solution aqueuse d'acide sulfurique.

a. **Période de charge :** le voltamètre alimenté par une source est traversé pendant un temps assez long (de l'ordre de une heure par exemple) par un courant de sens constant.

b. **Période de décharge :** ce voltamètre ainsi chargé peut être utilisé comme source, pile secondaire. Il restitue, en sens inverse, une partie de la quantité d'électricité qui l'a traversé.

c. **Capacité :** pour une charge très longue, la quantité d'électricité que peut restituer un tel accumulateur constitue sa capacité utile.

Cette capacité dépend du régime de charge et croît avec le nombre de charges et décharges successives subies par l'appareil.

d. **Polarisation du voltamètre** *ou modification des électrodes* : initialement, les électrodes sont identiques, plaques de plomb (oxydées superficiellement).

En fin de charge, l'anode (électrode +) est oxydée superficiellement à l'état de peroxyde de plomb brun PbO_2, la cathode (électrode —) est en plomb gris parsemé de fines bulles d'hydrogène (réducteur).

L'électrolyse de l'eau acidulée $\left(H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2 \right)$ a réalisé cette polarisation des électrodes.

Le voltamètre est devenu une pile constituée par :

— un électrolyte, solution sulfurique ;

— deux électrodes, PbO_2 électrode positive, Pb électrode négative.

La capacité d'un tel accumulateur est faible, car les actions chimiques utilisées ne s'effectuent qu'à la surface des électrodes.

Pour augmenter la capacité d'un accumulateur, il faut augmenter la masse de matière active, c'est-à-dire *faire travailler la partie profonde des électrodes.*

2. — ACCUMULATEUR AU PLOMB

Un accumulateur moderne comprend :

— **un bac** en matière isolante et inattaquable (verre, ébonite, matière plastique...) ;

— **l'électrolyte**, solution aqueuse d'acide sulfurique (sans impuretés) de concentration correspondant, environ, à une densité de 1,2 (25° Baumé) ;

— **des plaques à oxydes rapportés :**

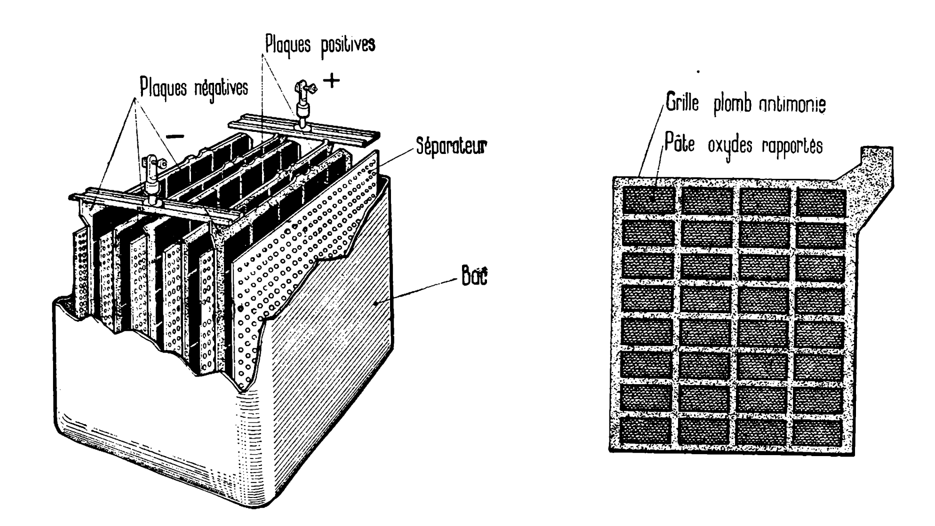
Les plaques positives(réunies à la borne +), séparées des ***plaques négatives*** (réunies à la borne —) par des lames minces perforées, les **séparateurs** (en bois ou ébonite).

Les plaques sont en général constituées par des *grilles de plomb* (antimonié pour augmenter la rigidité). Les alvéoles de ces grilles sont garnies à la presse d'une pâte de matière active.

Matière active :

— minium Pb_3O_4 et oxyde puce PbO_2 pour les plaques positives de couleur brune ;

— litharge PbO et plomb spongieux Pb pour les plaques négatives de couleur grise.



La disposition, dans le bac, des plaques positives et négatives alternées augmente la surface utile, et leur rapprochement diminue la résistance intérieure de l'accumulateur.

3. — THÉORIE DE LA DOUBLE SULFATATION

De nombreuses théories ont été présentées pour expliquer les réactions chimiques, au cours de la charge et de la décharge d'un accumulateur au plomb.

Pour des raisons de simplicité, nous citerons celle de la double sulfatation :

Pendant la décharge :

Il y a dissociation de l'eau : $H_2O \rightarrow 2\ H^+ + O^{--}$

— à la plaque négative (anode dans l'électrolyse),

$Pb + O^{--} + SO_4H_2 \rightarrow SO_4Pb + H_2O + 2$ électrons (lancés dans le circuit).

— à la plaque positive (cathode dans l'électrolyse),

$PbO_2 + 2\ H^+ + SO_4H_2 \rightarrow SO_4Pb + H_2O - 2$ électrons (repris au circuit) ;

Lorsque l'accumulateur est déchargé, la concentration de l'électrolyte en acide sulfurique a baissé (vérification au densimètre).

Pendant la charge :

— à la plaque positive (anode dans l'électrolyse),

$SO_4Pb + O^{--} + H_2O \rightarrow SO_4H_2 + PbO_2 + 2$ électrons (qui partent dans le circuit) ;

— à la plaque négative (cathode dans l'électrolyse),

$SO_4Pb + 2\ H^+ \rightarrow SO_4H_2 + Pb - 2$ électrons (qui sont repris au circuit).

Pendant la charge, la concentration de l'électrolyte en acide sulfurique augmente, justifiant la **réaction chimique globale :**

$$PbO_2 + Pb + 2\ SO_4H_2 \underset{\text{charge}}{\overset{\text{décharge}}{\rightleftarrows}} 2\ SO_4Pb + 2\ H_2O.$$

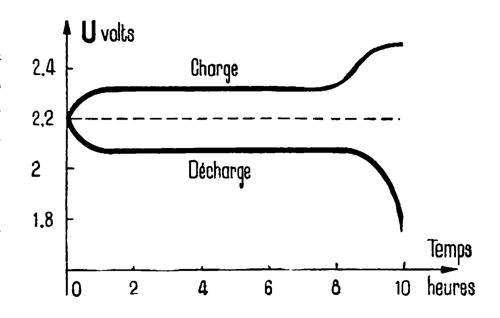
4. — FORCE ÉLECTROMOTRICE ET TENSION AUX BORNES

Pendant la charge, l'accumulateur est un récepteur ; il emmagasine de l'énergie sous forme chimique et *présente une force contre-électromotrice.*

Pendant la décharge, l'accumulateur est un générateur, il présente une force électromotrice.

En général, la *résistance intérieure d'un accumulateur au plomb est très faible* ; l'électrolyte est bon conducteur, les électrodes sont rapprochées et ont une grande surface. Cette résistance est souvent inférieure à 0,01 ohm, elle varie avec la concentration de l'électrolyte.

La tension U aux bornes d'un accumulateur varie au cours de la charge et de la décharge, on représente ses variations par des courbes.



Elle varie avec la concentration de l'électrolyte et la température. *Pendant presque toute la durée de la décharge, pour un courant modéré, nous pouvons considérer un accumulateur au plomb comme une source à tension constante voisine de 2 V.*

5. — CAPACITÉ D'UN ACCUMULATEUR

C'est la quantité d'électricité qu'il peut fournir pendant la décharge; *cette capacité se mesure en ampères-heures.*

Elle varie avec la température et la concentration de l'électrolyte.

Cette capacité est fonction de la masse de matière active, elle est de l'ordre de 10 Ah par kilogramme de plaques (elle peut atteindre 25 Ah par kilogramme de plaques pour certains accumulateurs transportables de construction soignée).

Le rendement en quantité d'un accumulateur est le rapport :

$$\eta_q = \frac{\textbf{quantité d'électricité restituée à la décharge}}{\textbf{quantité d'électricité fournie à la charge}}$$

Ce rendement peut atteindre 0,9 dans un accumulateur en bon état.

Pour un élément donné, ce rendement est meilleur avec un régime lent de charge et de décharge.

Énergie emmagasinée. *Elle se mesure en watts-heures* (à l'aide d'un compteur d'énergie) ; elle peut atteindre 50 Wh par kilogramme de plaques.

Le rendement en énergie est le rapport :

$$\eta_w = \frac{\textbf{énergie restituée à la décharge}}{\textbf{énergie fournie à la charge}}$$

il varie, en général, entre 0,7 et 0,8.

6. — RÈGLES PRATIQUES D'EMPLOI

a. Régime de charge et de décharge.

Il y a intérêt à effectuer ces opérations à faible régime de courant.

Pour éviter une trop longue inutilisation pendant la charge, et une trop faible puissance disponible pendant la décharge, on admet comme limite pratique, à régime constant, une charge complète en une douzaine d'heures :

$$\text{I ampères} = \frac{\text{capacité en Ah}}{12},$$

et une décharge complète en une dizaine d'heures :

$$\text{I ampères} = \frac{\text{capacité en Ah}}{10}.$$

Les à-coups de courant demandés à la décharge (au démarrage des moteurs par exemple) doivent être de courte durée, car ils peuvent produire une déformation et un décrochage de la matière active des plaques (par bouillonnements gazeux internes).

Aux basses températures la charge se fait mal, le rendement est mauvais.

b. **Indices de fin de charge.**

La différence de potentiel aux bornes est plus élevée (environ 2,5 V).

Le courant de charge décompose l'électrolyte sans effet utile, il se produit un bouillonnement, dégagement gazeux.

Si l'accumulateur contient peu d'électrolyte (batteries transportables), la concentration en acide est plus élevée (elle peut atteindre 28° B).

La couleur des plaques (quand elles sont saines) est un indice de fin de charge, plaques positives brun rouge, négatives gris bleu.

c. **Électrolyte.**

L'électrolyte gèle vers — 25° C.

L'évaporation et l'électrolyse, en charge poussée, consomment de l'eau ; il faut veiller à ce que les plaques restent complètement immergées et procéder au remplissage nécessaire avec de l'eau distillée.

d. **Accumulateur déchargé.**

Un accumulateur inemployé se décharge peu à peu (il perd environ 1 % de sa charge par jour) ; les plaques se recouvrent de sulfate de plomb stable qui les rend inutilisables (sulfatation).

Conservation sans emploi. On peut retirer l'électrolyte après charge complète et le remplacer par de l'eau distillée.

e. **Entretien.**

Les bacs et les connexions doivent être tenus propres. Il y a intérêt à graisser les connexions extérieures pour éviter les « sels grimpants ».

7. — USAGES DES ACCUMULATEURS

Les batteries d'accumulateurs sont constituées par un certain nombre d'éléments en série suivant la tension d'emploi.

Des batteries transportables à capacité réduite 45, 70, 90 Ah, tension 6 V (3 éléments) et 12 V (6 éléments) équipent les voitures automobiles pour le démarrage et l'allumage du moteur à essence, ainsi que pour l'éclairage.

Certains véhicules à traction électrique, pratiques pour des trajets réduits, à faible vitesse, à arrêts fréquents, sont équipés de batteries d'accumulateurs au plomb (tension de 24 à 250 V, capacité de plusieurs centaines d'ampères-heures). Pour ces véhicules, le poids de la batterie est souvent de l'ordre du tiers du poids total.

Les batteries fixes sont utilisées comme sources d'énergie auxiliaires, dans les installations de traction, d'électrochimie et d'éclairage. Elles équipent des réseaux de signalisation et de télécommande.

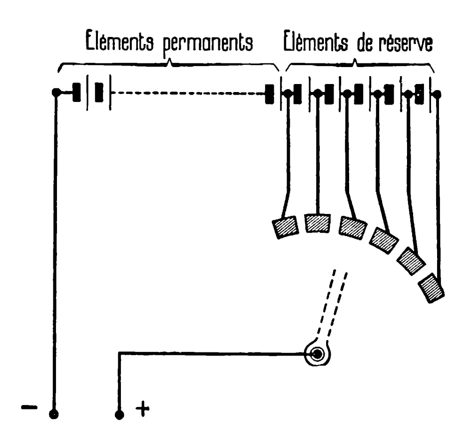
Ces batteries doivent être placées sur support isolant dans des locaux aérés.

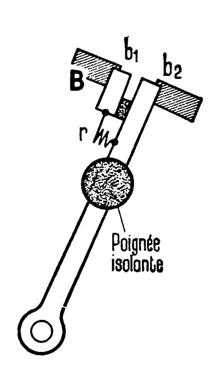
Remarque.

La tension aux bornes d'un élément varie pendant la charge et pendant la décharge.

Si l'on désire une décharge ou une charge à tension constante, pour les batteries importantes on prévoit quelques **éléments de réserve** progressivement ajoutés à l'ensemble, ou retranchés, par l'emploi d'un **réducteur**.

Le frotteur est constitué par deux balais réunis par une résistance : il ne doit ni couper le circuit, ni court-circuiter un élément.





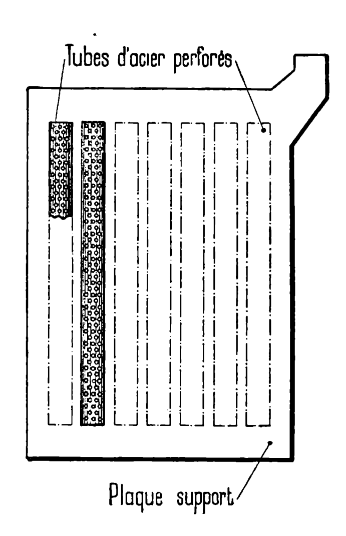
8. — ACCUMULATEURS ALCALINS

a. Constitution.

Chaque élément comporte un *bac* en acier nickelé ; l'*électrolyte* est une solution de potasse caustique (à 20 ou 30 %).

Les *électrodes* sont constituées par des enveloppes en acier nickelé, finement perforées, et contenant la matière active. Ces enveloppes sont montées sur des cadres en acier.

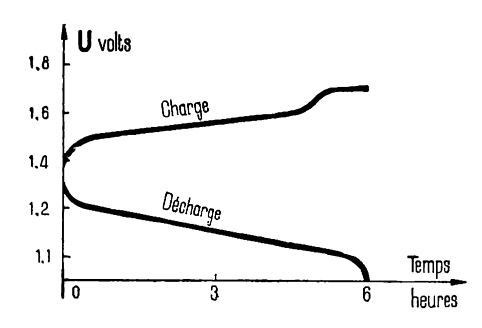
Le corps actif de la plaque positive est toujours un *oxyde de nickel*, celui de la plaque négative, *du fer finement divisé, ou un mélange de fer et de cadmium.*



b. Caractéristiques électriques.

La *résistance intérieure* de cet accumulateur est plus élevée que celle de l'accumulateur au plomb.

En charge, la *tension aux bornes* varie de 1,4 à 1,7 V; à la décharge, elle décroît lentement de 1,2 V environ jusqu'à 1 V.



c. Règles d'emploi.

Les accumulateurs alcalins sont **plus robustes** que les accumulateurs au plomb ; ils peuvent rester déchargés sans inconvénient.

Ils sont prévus pour une décharge en 5 h et peuvent supporter des débits importants sans détérioration, à la condition que leur température reste modérée (au delà de 40° C, la potasse dissout le fer de la plaque négative).

L'électrolyte augmente de résistance à basse température et gèle à — 35° C.

Les éléments fer-nickel doivent être chargés à régime assez élevé (en moins de 7 h), les éléments cadmium-nickel peuvent être chargés à régime faible (en 10 h ou plus).

La fin de la charge est indiquée par la tension aux bornes.

Entretien : les plaques doivent rester immergées dans l'électrolyte (compléter par de l'eau distillée).

Il faut veiller à la carbonatation de l'électrolyte par action du gaz carbonique atmosphérique, en évitant le renouvellement de l'air au-dessus de l'électrolyte.

Il y a lieu de remplacer l'électrolyte à intervalles de temps assez éloignés (par exemple tous les ans) et de graisser les bacs et connexions à la graisse minérale.

d. Comparaison avec l'élément au plomb.

Pour un même poids, l'énergie emmagasinée dans un accumulateur alcalin est du même ordre que celle dont on dispose avec un accumulateur au plomb.

Le prix de revient de l'accumulateur alcalin est plus élevé.

La tension aux bornes d'une batterie fer-nickel ou fer-cadmium-nickel n'est pas sensiblement constante comme celle d'une batterie au plomb.

Par leur durée supérieure et leur faible sensibilité aux surintensités, les accumulateurs alcalins concurrencent les accumulateurs au plomb dans l'équipement des véhicules autonomes à traction électrique et des réseaux de signalisation.

Remarque.

On met au point, actuellement, des accumulateurs constitués par la chaîne : oxyde d'argent, zincate de potassium en solution et zinc.

Leur rendement en énergie atteint 85 % et, pour des éléments de quelques kilogrammes, ils permettent d'emmagasiner une énergie 10 fois supérieure à celle d'un accumulateur au plomb de même masse.

La tension aux bornes d'un élément oxyde d'argent-zinc varie de 1,8 à 1,5 V environ.

EXERCICES

1 — Une pile Leclanché de force électromotrice 1,5 V, de résistance intérieure moyenne 2 Ω, pendant la durée de fonctionnement, débite sur une lampe de résistance 28 Ω. En supposant le courant constant jusqu'à épuisement de l'électrode de zinc pesant 100 g (l'électrolyte et le dépolarisant en quantité suffisante), calculer dans ces conditions :

a. le rendement de cette pile;
b. la durée de fonctionnement (Zn = 65, bivalent);
c. l'énergie cédée au circuit extérieur pendant ce temps.

Réponses : a. *0,93;* b. *1 650 heures environ;* c. *115 Wh.*

2 — Un élément Leclanché renferme 0,6 kg de solution saturée à 15° C de chlorure d'ammonium ; le crayon de zinc pèse 120 g.

a. Sachant que la concentration de la solution est 26,3 %, calculer la capacité de l'élément.
b. La force électromotrice de cet élément est 1,5 V, sa résistance intérieure 0,6 Ω. On utilise une pile de trois éléments identiques en série sur un circuit extérieur dont la résistance est de 5 Ω pendant, en moyenne, 15 mn par jour; calculer la durée de fonctionnement de la pile et l'énergie utile totale fournie pendant ce temps.
Masses atomiques : Zn = 65, Cl = 35,5, H = 1, N = 14.
(Le dépolarisant est en quantité suffisante.) (B. E. I.)

Réponses: a. *79 Ah;* b. *120 heures, utilisation 480 jours, énergie utile 260 Wh.*

3 — Quelle doit être la résistance d'un conducteur réunissant les deux bornes d'un élément Leclanché pour que la puissance dépensée par effet Joule dans ce conducteur soit de P = 1 watt? Les caractéristiques de l'élément sont E = 1,5 V, r = 0,5 Ω.

Réponse : Deux solutions $R_1 = 0{,}25\ \Omega$ *et* $R_2 = 1\ \Omega$.

4 — Une batterie d'accumulateurs de 6 V alimente en parallèle deux ampoules de 12 W et une ampoule de 3 W.

a. Calculer l'intensité du courant débité par la batterie lorsque les trois ampoules sont en circuit.
b. La capacité de cette batterie étant de 60 Ah, calculer sa durée de fonctionnement à ce régime.
c. Le rendement en quantité de cette batterie étant de 85 %, on demande combien de temps il faudra pour la recharger sous un régime de 9 A. (C. A. P.)

Réponses : 4,5 A ; 13 h 20 mn ; 7 h 50 mn.

5 — On veut, au moyen d'une batterie d'accumulateurs, assurer le service d'éclairage d'une installation comprenant des lampes fonctionnant simultanément :
5 lampes de 100 W-110 V, 10 lampes de 60 W-110 V, 10 lampes de 40 W-110 V.
La batterie doit fonctionner pendant 10 h par jour et l'on ne veut la recharger qu'une fois par jour :

a. Calculer la capacité de la batterie.
Le catalogue d'un constructeur donne, pour capacité des batteries qu'il fournit les valeurs suivantes : 14, 45, 60, 75, 90, 120, 150, 165 Ah.
b. Quelle capacité choisira-t-on ?
c. Déterminer le nombre d'éléments en service au début de la décharge (f. é. m. 2 V).
d. Déterminer le nombre d'éléments en service à la fin de la décharge (f. é. m. 1,8 V).
e. Quel sera le nombre d'éléments de réduction à introduire au fur et à mesure de l'abaissement de la f. é. m. de la batterie ? (C. A. P.)

Réponses: 136 Ah; 150 Ah; 55 éléments; 61 éléments; 6 éléments.

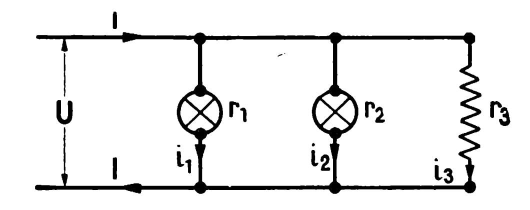
15. — Groupement de résistances

I. — MONTAGE EN DÉRIVATION (OU EN PARALLÈLE)

La distribution de l'énergie électrique se fait, en général, à tension constante. *Les récepteurs sont montés, en dérivation, sur la ligne qui entretient une même tension U à leurs bornes.*

Les connexions sont supposées de résistance négligeable devant celle des récepteurs.

I. — RÉCEPTEURS THERMIQUES EN DÉRIVATION



Étudions le montage suivant : deux lampes 120 V- 60 W et un réchaud 120 V- 600 W, sur une distribution à 120 V.

a. **Courants.**

Courant absorbé par chaque lampe : $i_1 = i_2 = \frac{P_1}{U} = \frac{60}{120} = 0{,}5$ **A.**

Courant absorbé par le réchaud : $i_3 = \frac{P_3}{U} = \frac{600}{120} = 5$ A.

La puissance P fournie par la ligne est $P = 2 \times 60 + 600 = 720$ W,

pour un courant total débité $I = \frac{P}{U} = \frac{720}{120} = 6$ A.

La somme des courants partiels dans chaque dérivation est égale au courant total débité.

$$I = i_1 + i_2 + i_3$$

b. **Résistances.**

Appliquons la loi d'Ohm au calcul de chaque résistance, en régime normal ;

— pour une lampe, $r_1 = r_2 = \frac{U}{i_1} = \frac{120}{0,5} = 240\ \Omega$,

— pour le réchaud, $r_3 = \frac{U}{i_3} = \frac{120}{5} = 24\ \Omega$.

Appelons R la ***résistance équivalente*** à l'ensemble des dérivations ; c'est la ***résistance d'un conducteur unique, qui, sous la même tension U, serait parcourue par le même courant total I.***

$R = \frac{U}{I}$, c'est-à-dire dans le cas envisagé $R = \frac{120}{6} = 20\ \Omega$.

Cette résistance équivalente à l'ensemble est plus faible que chacune des résistances en dérivation.

D'une manière générale $I = i_1 + i_2 + i_3 = \frac{U}{r_1} + \frac{U}{r_2} + \frac{U}{r_3} = \frac{U}{R}$

c'est-à-dire $U \times \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}\right) = U \times \frac{1}{R}$

La résistance équivalente R à un ensemble de dérivations peut se calculer

par la relation $$\boxed{\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}}$$

Dans l'exemple numérique traité,

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{240} + \frac{1}{240} + \frac{1}{24} = \frac{12}{240} \qquad R = 20\ \Omega$$

L'inverse $\frac{1}{R}$ d'une résistance est appelée *conductance* : dans le montage des résistances en dérivation, les conductances s'ajoutent.

Dans le cas où il s'agit de *n dérivations identiques* :

$$\frac{1}{R} = \frac{n}{r}, \quad \text{soit} \quad R = \frac{r}{n}.$$

Remarques.

1° Les *n* conducteurs identiques de section *s*, en dérivation, sont équivalents à un conducteur unique de section *n* fois plus grande, c'est-à-dire *n* fois moins résistant.

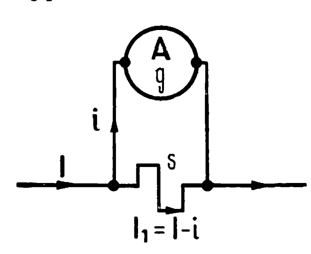
2° Le calcul de la résistance équivalente R à un ensemble de dérivations ne s'applique pas au cas où l'un des récepteurs en dérivation présente une force contre-électromotrice.

En effet, la forme $I = \frac{U}{R}$ de la loi d'Ohm ne peut s'appliquer à des récepteurs autres que les récepteurs thermiques.

2. — SHUNT D'AMPÈREMÈTRE

a. Principe.

En général, les ampèremètres sensibles ne peuvent supporter que des courants faibles (inférieurs à 0,1 A) ; les constructeurs ont prévu l'utilisation de ces appareils avec des shunts.



Un shunt est une résistance faible, intercalée en série dans le circuit à étudier ; l'ampèremètre est monté en dérivation aux bornes du shunt. ***L'ensemble ampèremètre et son shunt,*** reliés par des connexions appropriées, appelées cordons, ***constitue un nouvel appareil*** qui permet de mesurer un courant très supérieur à celui que l'ampèremètre seul peut supporter.

Le courant I qui parcourt le circuit étudié se partage en :

i courant de mesure qui traverse l'ampèremètre ;

$I_1 = I - i$ courant qui traverse le shunt.

Le courant de mesure i est une fraction connue du courant I à mesurer.

b. Calcul.

Soit à déterminer la résistance s du shunt à employer pour que l'ampèremètre de résistance g (ampèremètre et cordons) soit traversé par le courant de mesure $i = \frac{I}{10}$, I courant à mesurer.

Solution.

Soit $I_1 = I - i$ le courant dans le shunt.

La même tension U entre les bornes M et N provoque :

$$i = \frac{I}{10} \text{ dans l'ampèremètre ;} \qquad I_1 = \frac{9}{10} I \text{ dans le shunt.}$$

Le shunt s doit donc être 9 fois moins résistant que l'ampèremètre g; dans ce cas, $s = \frac{g}{9}$.

Parce que $i = \frac{I}{10}$, on dit que ***l'ampèremètre est shunté au*** $\frac{1}{10}$.

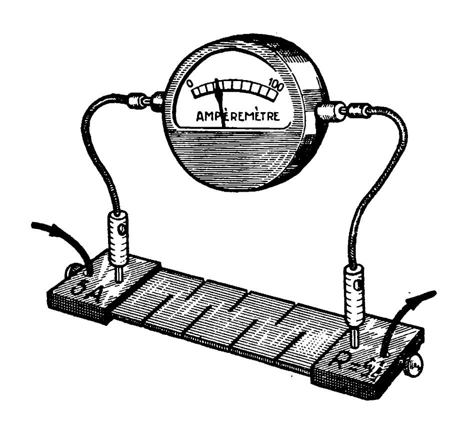
Si l'aiguille marque sur le cadran, gradué en ampères, $2{,}8 \text{ A} = i$, le courant I à mesurer est $2{,}8 \times 10 = 28$ A.

c. **Généralisation.**

De la même façon avec les shunts, $s' = \frac{g}{99}$, $s'' = \frac{g}{999}$ $\cdots$ $s_n = \frac{g}{n-1}$,

le même ampèremètre sera shunté au $\frac{1}{100}$, au $\frac{1}{1\,000}$, au $\frac{1}{n}$.

d. **Réalisation.**



Un shunt est, en général, constitué par une barette de maillechort (ou plusieurs barettes en dérivation) terminée à ses deux extrémités par des bornes en laiton.

La barette de maillechort du shunt est entaillée de traits de scie alternés qui allongent plus ou moins le trajet du courant ; le constructeur a réglé le shunt à la résistance voulue à l'aide de ces entailles.

Chaque shunt porte :
— un numéro de référence ;
— un courant I ;
— la chute de tension maximum entre les bornes des cordons ou la résistance du shunt entre ces bornes.

Le courant I indiqué sur le shunt donne la limite d'emploi de l'ampèremètre shunté; la graduation totale du cadran correspond à cette valeur du courant I.

Ainsi, avec le shunt marqué 5 A, l'ampèremètre, dont le cadran porte 100 divisions, peut mesurer jusqu'à 5 A ; chaque division vaut 0,05 A.

Un ampèremètre est souvent livré avec une gamme de shunts ; il offre ainsi plusieurs sensibilités.

Avec la gamme de shunts suivante, un même ampèremètre (cadran à 100 divisions) peut mesurer, avec la même précision relative, divers courants.

Shunt	1 A	5 A	10 A	50 A
Mesure	0 à 1 A	0 à 5 A	0 à 10 A	0 à 50 A
Valeur d'une division	0,01 A	0,05 A	0,1 A	0,5 A

Cet ampèremètre, employé seul, pourrait, par exemple, mesurer directement un courant de valeur maximum 0,1 A, indication portée sur le cadran (ainsi que sa résistance et son numéro de référence).

Un shunt (avec ses cordons) ne convient qu'à l'ampèremètre étalonné avec lui.

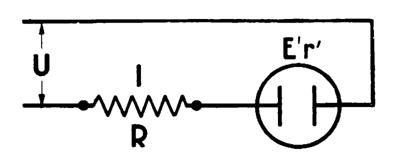
De nombreux ampèremètres à plusieurs sensibilités ont leurs shunts à l'intérieur du boîtier. Les liaisons réalisées par le constructeur correspondent à l'emploi d'un couple de bornes déterminé (indiqué sur le boîtier), pour effectuer la mesure à la sensibilité désirée.

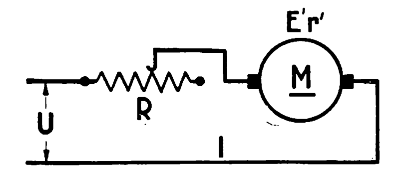
II. — MONTAGE EN SÉRIE

1. — RELATIONS

Dans ce cas, tous les récepteurs sont traversés par le même courant I.

Ils peuvent transformer l'énergie électrique fournie par la source en énergie thermique, mécanique, chimique...





Si U est la différence de potentiel aux bornes de l'ensemble, la puissance électrique fournie P = UI se décompose en puissances p_1, p_2, p_3, ..., dans les divers récepteurs.

La puissance est de la forme RI^2 pour les récepteurs thermiques de résistance R et de la forme $E'I + r'I^2$ pour les récepteurs présentant une force contre-électromotrice E' et une résistance r'.

La conservation de l'énergie nous permet d'écrire le *bilan des puissances.*

$$P = p_1 + p_2 + p_3 + ...$$

c'est-à-dire $$UI = u_1I + u_2I + u_3I + ...$$

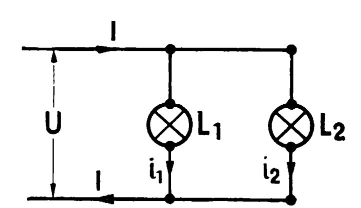
soit $$U = u_1 + u_2 + u_3...$$

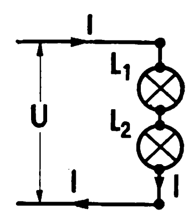
u_1, u_2, u_3 sont les différences de potentiel partielles aux bornes des récepteurs successifs.

Chaque récepteur dispose à ses bornes d'une tension u partielle qui dépend de la tension d'alimentation U et de la constitution du circuit.

2. — COMPARAISON DU MONTAGE EN DÉRIVATION ET DU MONTAGE EN SÉRIE

Le filament de tungstène d'une lampe 120 V, 60 W en régime normal est porté à une température de 2 000°, le coefficient α de température du tungstène est 0,005.





Comparer les courants absorbés et les puissances consommées dans les deux cas suivants :

a. Deux lampes identiques branchées en dérivation sur un réseau à 120 V.

b. Deux lampes identiques branchées en série sur ce réseau (on admettra dans ce cas que la température des filaments est 1 300° C).

Solution.

a. **Montage en dérivation :**

Chaque lampe est à la tension U = 120 V ; elle fonctionne en régime normal, consomme la puissance $P_1 = 60$ W, absorbe le courant $i_1 = i_2 = \frac{P_1}{U} = \frac{60}{120} = 0{,}5$ A ;

Pour l'ensemble des deux lampes :

courant $I = 2\ i_1 = \mathbf{1\ A}$, puissance $P = 2\ P_1 = \mathbf{120\ W}$.

b. **Montage en série :**

Chaque lampe est à la tension $U' = \frac{U}{2} = 60$ V.

Résistance du filament à 2 000° C (régime normal) : $R = \frac{U}{i_1} = \frac{120}{0{,}5} = 240\ \Omega$

Résistance du filament à 0° C : $R_0 = \frac{R}{1 + \alpha t} = \frac{240}{1 + 0{,}005 \times 2\,000} = 21{,}8\ \Omega$

Résistance du filament à 1300° C :

$R_1 = R_0\ (1 + \alpha\ t) = 21{,}8 \times (1 + 0{,}005 \times 1300) = 164\ \Omega$ environ.

Courant absorbé par chaque lampe, et par l'ensemble (elles sont en série) :

$$I = \frac{U}{2\ R_1} = \frac{120}{328} = \mathbf{0{,}37\ A}$$

Puissance consommée par chaque lampe : $P'_1 = U' \times I = 60 \times 0{,}37 = \mathbf{22\ W}$

Pour l'ensemble : $P' = 2\ P'_1 = \mathbf{44\ W}$

Dans le premier cas, le réseau fournit $\begin{cases} \mathbf{I = 1\ A} \\ \mathbf{P = 120\ W} \end{cases}$

Dans le deuxième cas, il fournit $\begin{cases} \mathbf{I' = 0{,}37\ A} \\ \mathbf{P' = 44\ W} \end{cases}$

Remarque.

Dans le cas où les récepteurs en série ne sont pas identiques, les tensions partielles aux bornes de chacun sont différentes ; il en est de même pour les puissances consommées.

III. — CONCLUSION

Dans tous les cas, la source fournit le courant I sous la tension U, la puissance totale mise en jeu est

$$P = UI = \text{somme des puissances partielles fournies à chaque récepteur.}$$

Dans le montage dérivation

U est la tension commune à tous les récepteurs ;

$$I = i_1 + i_2 + i_3 \ldots = \text{somme des courants partiels dans chaque récepteur.}$$

Dans le montage série

le même courant I parcourt tous les récepteurs ;

$$U = u_1 + u_2 + u_3 \ldots = \text{somme des différences de potentiel partielles aux bornes de chaque récepteur.}$$

EXERCICES

1 — Aux bornes d'un secteur 120 V, on branche simultanément, en dérivation, 10 lampes de 40 W-120 V et un réchaud de 300 W-120 V.

a. Calculer la résistance de chaque élément dans les conditions normales de fonctionnement et le courant qui le parcourt.

b. Déterminer de deux manières (à titre de vérification) la résistance équivalente à l'ensemble de l'installation.

Réponses : a. *1 lampe 360 Ω courant* $i_1 = \frac{1}{3}$ *A, réchaud 48 Ω courant* $i_2 = 2{,}5$ *A ;*

b. $R = 20{,}5\ \Omega$

2 — On dispose de trois résistances, deux identiques r_1 et $r_2 = 1\ \Omega$, la troisième $r_3 = 2\ \Omega$. En utilisant tout ou partie de cet ensemble et divers modes de branchement, de quelle gamme de résistances dispose-t-on ?

Réponses : Exprimées en ohms : 0,4 — 0,5 — 0,66 — 0,75 — 1 — 1,66 — 2 — 2,5 — 3 et 4.

3 — Un rhéostat est branché aux bornes A et B d'un conducteur dont la résistance est 6 Ω. Quelle doit être la résistance utile du rhéostat pour que l'ensemble présente, entre A et B, une résistance de 1 Ω ?

Réponse : 1.2 Ω.

4 — L'installation d'éclairage d'une voiture de métropolitain fonctionne sous la tension de 600 V et comporte 20 lampes marquées 120 V - 40 W. Préciser le mode d'association adopté. Calculer le courant absorbé et la puissance de l'installation.

Réponses : en parallèle quatre séries de 5 lampes ; 1,33 A ; 800 W.

5 — Un fer électrique est marqué 300 W - 110 V. Pour utiliser ce fer sans danger de détérioration avec un réseau de 220 V, et pour que son fonctionnement soit normal, on veut le protéger par une résistance R. Préciser le mode de branchement et la valeur de cette résistance. Inconvénient de ce procédé.

Réponses : R = 40,3 Ω ; montage en série ; gaspillage d'énergie.

6 — Un milliampèremètre utilisable de 0 à 10 mA présente une résistance de 24,5 Ω. Le cadran a 100 divisions, la graduation est proportionnelle au courant.

Calculer la résistance du shunt nécessaire pour obtenir un ampèremètre utilisable jusqu'à 0,5 A.

Quelle variation de courant correspond alors à chaque division ?

Réponses : 0,5 Ω ; 5 mA.

7 — Un ampèremètre peut être utilisé sans shunt jusqu'à 0,5 A, son cadran porte 100 divisions, graduation proportionnelle au courant. Quelle valeur du courant I à mesurer représente une division dans chaque cas suivant :

a. ampèremètre utilisé soit avec le shunt marqué 3 A, soit avec le shunt marqué 5 A ;

b. ampèremètre utilisé avec ces 2 shunts en dérivation ;

c. ampèremètre shunté par le groupe des 2 shunts en série.

Réponses : 0,03 A ; 0,05 A — 0,075 A — 0,021 A.

8 — Un ampèremètre porte sur son cadran les indications 10 mA - 0,1 V. Ceci signifie que la déviation maximum est obtenue pour un courant de 100 mA correspondant à une tension de 0,1 V à ses bornes.

a. Quelle est la résistance de cet ampèremètre ?

b. Quelle est la résistance équivalente à l'ensemble de cet ampèremètre et du shunt marqué 2 A ?

c. Quelle est la résistance de ce shunt ?

Réponses : 1 Ω ; 0,05 Ω ; $\frac{1}{19}$ Ω.



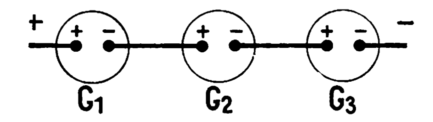
16. — Groupement de générateurs identiques

I. — GROUPEMENT EN SÉRIE

I. — CAS GÉNÉRAL

Ce montage constitue une chaîne dans laquelle deux éléments voisins sont réunis par leurs bornes de noms contraires.

La borne positive et la borne négative du groupement appartiennent, respectivement, aux deux éléments extrêmes.



Soient n générateurs identiques de force électromotrice e_1 et de résistance r_1 ; appelons E la force électromotrice et r la résistance de l'ensemble.

a. **En circuit ouvert** nous pouvons contrôler au voltmètre que la force électromotrice E (tension à vide) est la somme des forces électromotrices e_1, c'est-à-dire $E = ne_1$.

L'intérêt d'un tel groupement est la possibilité d'obtenir des tensions élevées.

b. **En circuit fermé** sur une résistance extérieure R, il s'établit un courant I ;

— les résistances r_1 sont en série, par suite $r = nr_1$;

— la loi d'Ohm, appliquée au circuit fermé, donne $I = \dfrac{ne_1}{R + nr_1}$.

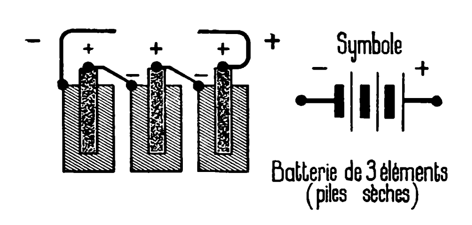
Le courant maximum est fourni *lorsque* $R = 0$; *dans ce cas*, $I = \dfrac{ne_1}{nr_1}$,

le courant est le même que pour un seul générateur en court-circuit.

2. — EXEMPLES

Cas d'une batterie de piles.

Les batteries de piles sèches sont souvent formées de trois éléments en série (lampe de poche).



En circuit ouvert, un voltmètre indique 1,5 V environ aux bornes d'un élément, et environ 4,5 V = 1,5 × 3 aux bornes de l'ensemble.

Nous avons déterminé (leçon 11) la résistance intérieure r_1, voisine de 0,3 Ω par élément ; pour la batterie, $r = 1$ Ω environ.

En régime normal d'éclairage, cette pile débite sur une ampoule de résistance R voisine de 20 Ω, le courant $I = \frac{4,5}{20 + 1} = 0,2$ A environ.

On constate, en réunissant les bornes de la pile à un ampèremètre peu résistant, un débit temporaire, d'environ 2 A, qui décroît rapidement par polarisation (leçon 14).

Cas d'une batterie d'accumulateurs au plomb

(utilisée pour le démarrage et l'éclairage des automobiles).

Chaque élément a une force électromotrice e_1 voisine de 2 V et une résistance r_1 très faible (0,001 Ω environ).

Une batterie de 6 V est constituée par 3 éléments en série.

Si elle est employée sur un circuit de résistance R notable, quelques ohms par exemple, la résistance intérieure r est négligeable devant R et la chute de tension interne rI es négligeable devant U.

En conséquence :

— le courant I est voisin de $I = \frac{ne_1}{R} = \frac{6}{R}$;

— la tension aux bornes U est presque égale à E (U = RI = E — rI).

II. — GROUPEMENT EN DÉRIVATION

PRINCIPE

La borne positive de l'ensemble est connectée à toutes les bornes positives.

La borne négative de l'ensemble est connectée à toutes les bornes négatives.

Chacun des n éléments est défini par sa force électromotrice e_1 et sa résistance r_1 ; le groupement est défini par E et r.

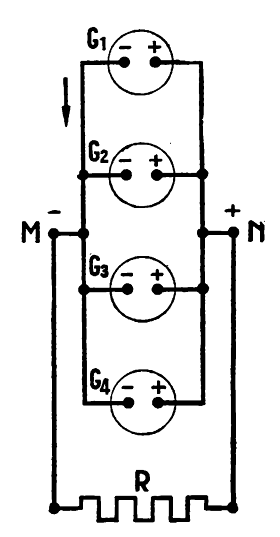
a. **En circuit ouvert**, nous constatons, à l'aide du voltmètre, que $E = e_1$.

b. **En circuit fermé**, sur une résistance extérieure R, le courant I débité par le groupement est la somme de n courants identiques i, $I = n \times i$.

La loi de Kirchhoff appliquée au circuit fermé dans la maille $MRNG_1M$ permet d'écrire $e_1 = r_1 i + RI$.

c'est-à-dire $E = \frac{r_1 I}{n} + RI = \left(\frac{r_1}{n} + R\right) I$

$$I = \frac{E}{R + \frac{r_1}{n}}$$



Cette forme met en évidence la résistance intérieure du groupement :

$r = \frac{r_1}{n}$ (résistance de l'ensemble des n générateurs en dérivation).

Si le circuit extérieur présente une résistance R négligeable devant cette résistance intérieure, le courant débité $I = \frac{E}{\frac{r_1}{n}} = \frac{nE}{r_1}$ peut être très grand pour un nombre n suffisant de générateurs ainsi groupés.

Remarque.

Quand les forces électromotrices ne sont pas réglables, ce montage est à éviter (cas des piles et des accumulateurs).

En effet, même si le circuit extérieur est ouvert, les forces électromotrices, non rigoureusement identiques, provoquent, dans le système, des courants parasites internes, d'où gaspillage d'énergie.

Le réglage des forces électromotrices des générateurs à coupler en parallèle est une opération indispensable et parfois délicate.

III. — GROUPEMENT MIXTE

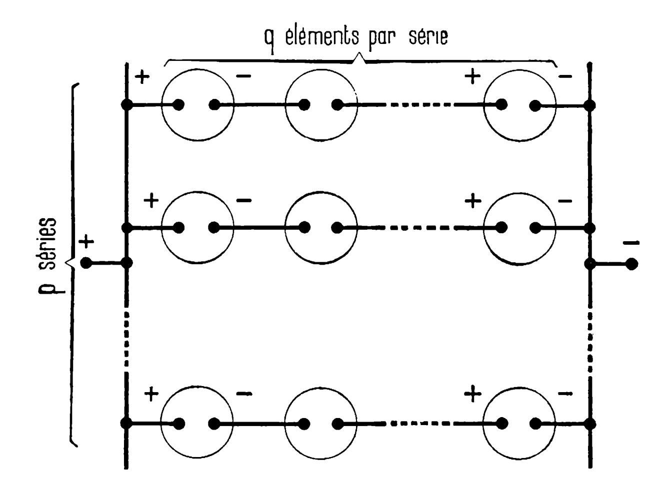
PRINCIPE

On peut envisager un *groupement mixte, c'est une combinaison des deux groupements précédents.*

De tels groupements sont peu employés.

On dispose de n éléments identiques définis par leur force électromotrice e **et leur résistance** intérieure r_1, groupés en p séries de q éléments chacune ($n = p \times q$).

La force électromotrice E de l'ensemble est celle d'une seule série $E = qe$.
La résistance intérieure d'une série est $q \times r_1$, la résistance intérieure r de tout le groupement des p séries en parallèle est $r = \frac{qr_1}{p}$.



En appliquant la loi d'Ohm à cet ensemble générateur, fermé sur une résistance extérieure R, nous pouvons écrire : $I = \frac{E}{R + r}$ ou $I = \frac{qe}{R + \frac{qr_1}{p}}$

$$I = \frac{pqe}{pR + qr_1} = \frac{ne}{pR + qr_1}$$

I est maximum lorsque $pR = qr_1$, puisque le produit $pR \times qr_1 = nRr_1$ est constant.

EXERCICES

1 — Pour constituer un générateur, on dispose de 6 éléments de pile présentant chacun une force électromotrice de 1,5 V et une résistance de 1,2 Ω. Comparer les courants obtenus dans le circuit extérieur de résistance R pour les divers montages :
a. les 6 éléments en série ;
b. les 6 éléments en parallèle ;
c. en parallèle, deux séries de 3 éléments.
Étudier chaque montage dans les trois cas suivants :
1° R = 20 Ω ; 2° R = 1,8 Ω ; 3° R = 0,2 Ω.
Réponses : 1° a. *0,33 A ;* b. *0,074 A ;* c. *0,20 A. — 2°* a. *1 A ;* b. *0,75 A ;* c. *1,25 A ; 3°* a. *1,21 A ;* b. *3,75 A ;* c. *2,25 A.*

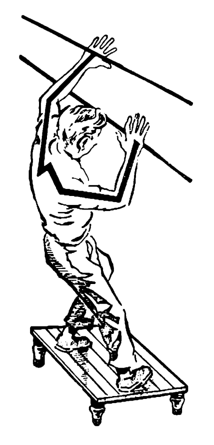
2 — On veut établir un courant de 3 A dans un voltamètre de résistance 0,9 Ω et de force contre-électromotrice 1,5 V. On dispose d'éléments de pile de force électromotrice 1,8 V et de résistance intérieure 0,24 Ω. Le courant maximum débité par un élément est 2 A. Déterminer le nombre minimum d'éléments à utiliser, leur mode de groupement et la valeur r de la résistance de réglage à placer en série avec le voltamètre.
Réponse : En parallèle, deux séries de 3 éléments : **r = *0,04* Ω.**

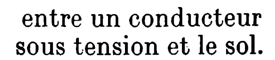
Action du courant sur le corps humain

I. — DANGERS DU COURANT ÉLECTRIQUE

Le corps humain peut être traversé par le courant électrique *lorsqu'il établit une dérivation :*

entre deux conducteurs sous tension ;

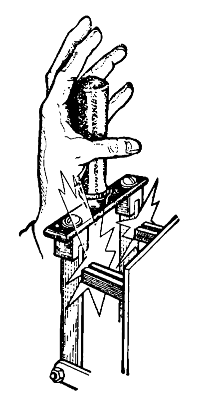




entre un conducteur sous tension et le sol.



Le courant qui traverse le corps devient dangereux à partir de 20 mA ; un courant de 100 mA est mortel.



L'*électrocution provoque la mort* par action sur le système nerveux, commotion, qui entraîne soit la paralysie du cœur, soit l'arrêt de la respiration.

Elle s'accompagne de phénomènes thermiques et électrolytiques dans les tissus.

Des brûlures locales, longues à guérir, peuvent être produites par l'arc électrique au cours de l'exécution de soudures à l'arc, ou par la manœuvre maladroite d'un interrupteur non protégé.

Remarque.

Les *courants alternatifs de basse fréquence*, généralement utilisés [réseau de distribution de fréquence 50 Hz (1)], produisent *des contractions musculaires* qui empêchent la victime de lâcher le conducteur tenu en main.

Les *courants de haute fréquence* ($f > 500\,000$ Hz) sont moins dangereux ; ils trouvent leur application en électricité médicale (d'Arsonvalisation, diathermie).

2. — RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE DU CORPS HUMAIN

Les tissus internes sont assez bons conducteurs (milieu aqueux et salé).

La peau sèche présente une forte résistivité qui peut varier d'un individu à l'autre.

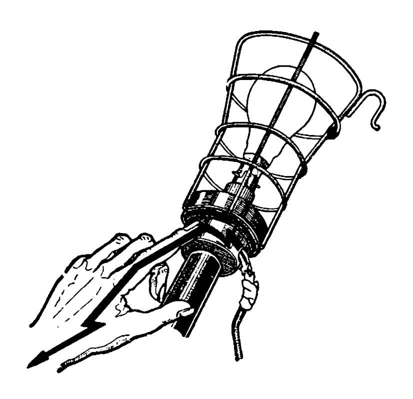
Lorsque la peau est mouillée, ou lorsque le contact s'effectue sur une grande surface de peau sèche avec une certaine pression, la résistance du corps peut descendre au-dessous de 100 Ω.

Dans ces conditions, la basse tension, 120 V par exemple, devient très dangereuse.

Les très basses tensions, dites ***de sécurité***, sont limitées à 50 V en courant continu et 24 V en courant alternatif.

3. — APPAREILS DANGEREUX

a. Tout appareil alimenté par un fil souple et non tenu par un manche isolant.



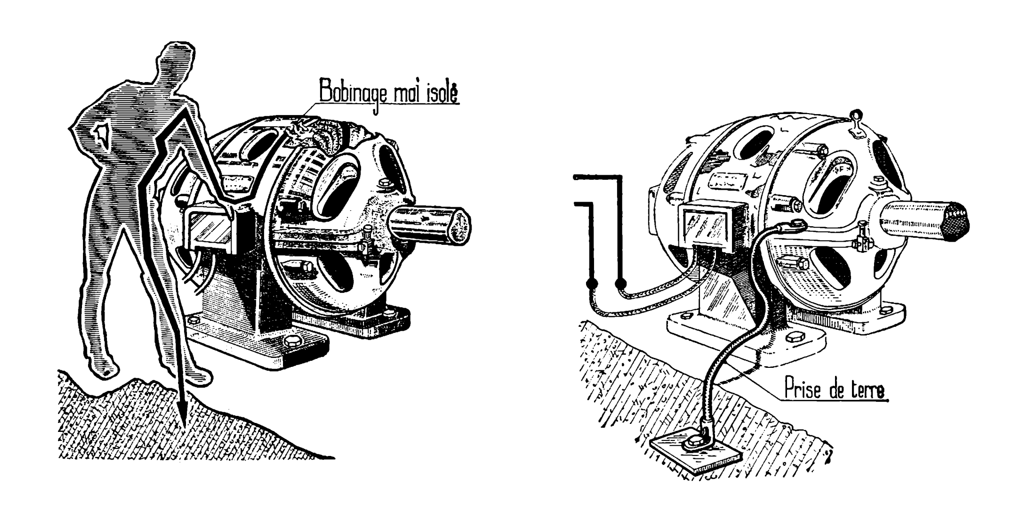
Les mouvements provoquent peu à peu l'usure du câble ; cela peut amener un contact entre le conducteur et la masse de l'objet tenu à la main : c'est le cas des lampes balladeuses, fers à souder, allume-gaz...

Le contact devient d'autant plus dangereux pour l'usager que le sol est plus humide ou qu'il est recouvert de déchets ou de plaques métalliques.

---

(1) On dit que la fréquence est 50 hertz ou 50 Hz, ou 50 périodes par seconde. [Hertz, physicien allemand (1857-1894)].

b. Tout appareil dont les conducteurs intérieurs peuvent être mis en contact avec le bâti (par suite de l'usure de l'isolant causée par les vibrations, le frottement, la température) présente le même danger pour l'ouvrier qui touche ce bâti, mis accidentellement sous tension.



La précaution indispensable, rendue obligatoire par décret, consiste en la *liaison au sol*, par un fil spécial, de la masse de tout appareil qui est alimenté sous une tension supérieure à la tension de sécurité.

4. — PRESCRIPTIONS ET CONSEILS

Les installations électriques doivent répondre aux prescriptions de l'arrêté du 30 avril 1935 des ministres des Travaux Publics et du Commerce, et du décret du 4 août 1935 du ministre du Travail.

Il faut lire les affiches apposées auprès des installations dangereuses (métropolitain, stations de transformation...) et se conformer à leurs prescriptions :

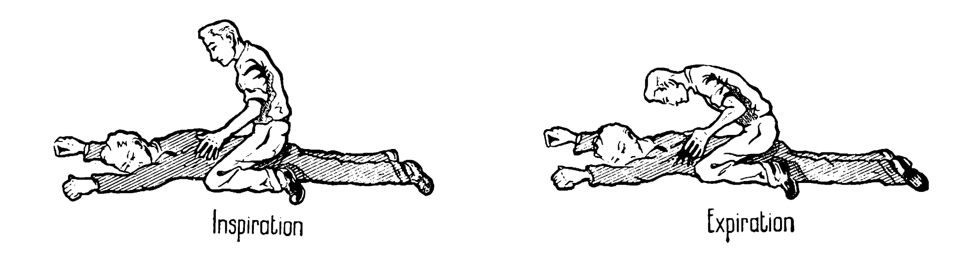
Éviter toute imprudence, ne pas toucher les fils même tombés à terre...

Le cas échéant, pouvoir porter secours à un électrocuté.

a. ***Dans le cas de la basse tension*** (inférieure à 600 V en courant continu et à 250 V en courant alternatif), si la victime est en contact avec un objet ou un conducteur sous tension, l'en écarter en ayant pris soin de bien s'isoler soi-même : de la victime, du conducteur dangereux et du sol, au moyen de matériaux convenables (bois sec, caoutchouc...) ;

b. ***En moyenne tension et en haute tension, n'intervenir qu'après la coupure de la ligne*** au sectionneur, coupure réalisée par un agent de la compagnie de distribution.

Dans tous les cas, appeler le médecin et, en attendant son arrivée, pratiquer sur la victime inanimée la respiration artificielle (méthode Schæfer).



Nota.

Les postes de secours des sapeurs-pompiers disposent, en général, d'appareils de respiration artificielle.



Oscilloscope cathodique

L'oscilloscope cathodique est un appareil qui donne, sur un écran, la courbe représentative d'une tension ou d'un courant en fonction du temps.

I. — COURANT ÉLECTRIQUE DANS LE VIDE

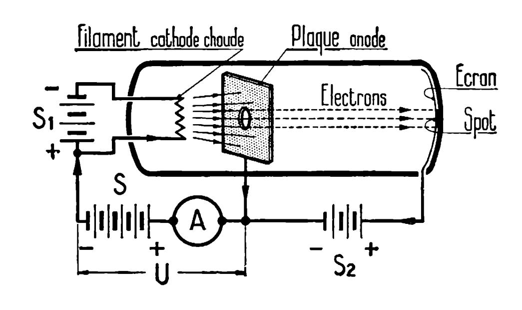
Dans une enceinte vide d'air, en verre par exemple, un filament conducteur chauffé émet des électrons.

En effet, l'agitation moléculaire provoquée par l'élévation de température « secoue » violemment les atomes du filament, de ce fait des électrons peuvent s'éloigner des noyaux.

Le filament est relié aux pôles d'une source S_1.

Le pôle négatif d'une autre source S est relié au filament et le pôle positif de cette source à une plaque conductrice.

Des électrons du filament, libérés par la chaleur, sont attirés et captés par la plaque : la source débite un courant mesurable par un ampèremètre sensible.



Ce courant dépend :

1° de la nature et de la température du filament ;

2° de la différence de potentiel filament-plaque (cathode-anode).

2. — TUBE A RAYONS CATHODIQUES

Pour une différence de potentiel suffisante, plusieurs centaines de volts, entre la cathode chaude et l'anode, les électrons peuvent acquérir une grande vitesse au cours de leur trajet.

L'ensemble des électrons ainsi animés constitue le faisceau cathodique.

Si la plaque anode est percée, une partie du faisceau cathodique est interceptée, une autre partie, sous l'effet de la vitesse acquise, traverse l'orifice, poursuit son trajet et vient frapper la paroi extrême de l'ampoule ou *écran.*

Cette paroi de verre est enduite d'une *substance fluorescente* : silicate de zinc (vert jaunâtre), sulfate de sodium (bleuâtre) ou oxyde de zinc (vert).

Cette substance s'illumine aux points d'impact des électrons, une tache lumineuse apparaît alors sur l'écran.

L'écran est relié au pôle positif d'une source auxiliaire, qui capte les électrons ayant atteint la paroi (cette paroi de verre est rendue conductrice par son enduit).

On appelle *canon à électrons* l'ensemble filament-plaque et anodes auxiliaires de concentration. Ce dispositif fournit un faisceau d'électrons très mince, ou rayon cathodique qui donne sur l'écran une tache très petite, presque ponctuelle et très lumineuse appelée *spot.*

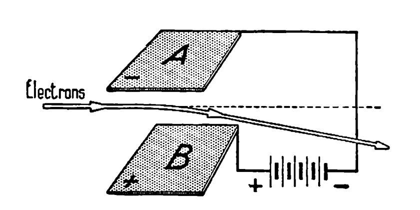
L'ampoule, appelée tube à rayons cathodiques, est, en général, de forme cylindro-conique, l'écran étant la grande base du cône.

3. — DÉVIATION DU RAYON CATHODIQUE

Ce rayon, ensemble de trajectoires d'électrons, est un véritable courant électrique.

Toute déviation de ce rayon est observée grâce au déplacement correspondant du spot sur l'écran.

Le rayon cathodique est dévié par un champ électrique.



Considérons deux plaques conductrices A et B parallèles réunies aux bornes d'une source.

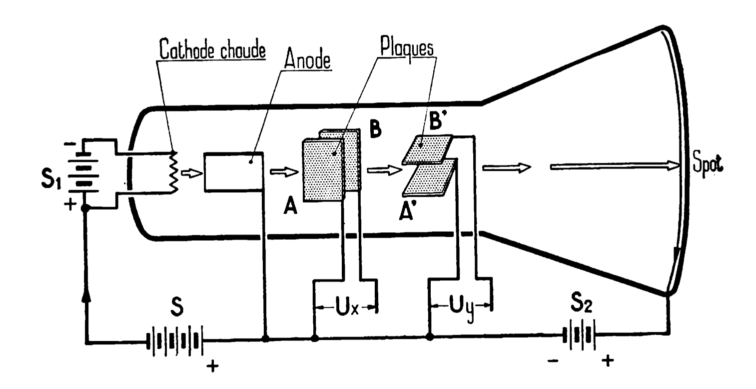
Il s'établit entre ces deux plaques une différence de potentiel U en même temps que la plaque A (réunie au pôle — de la source) se charge négativement, et que la plaque B (réunie au pôle +) se charge positivement.

Tout électron, corpuscule chargé négativement, situé entre les deux plaques, est attiré par B et repoussé par A. On dit qu'il est soumis à un champ électrique.

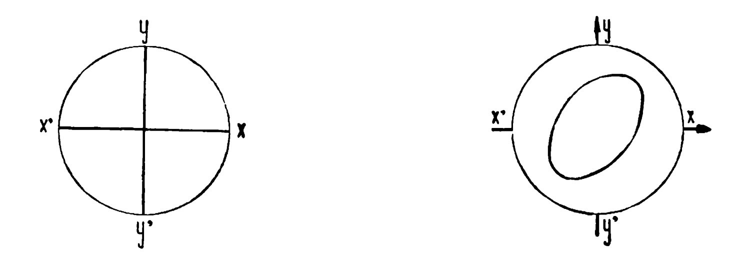
Le rayon cathodique, passant entre les deux plaques est dévié très notablement dans le sens AB pour une différence de potentiel U de quelques volts.

4. — RÉALISATION DE L'OSCILLOSCOPE

Un tube à rayons cathodiques permet d'obtenir un spot très lumineux au centre de l'écran. Ce tube est muni de deux couples perpendiculaires de plaques parallèles AB et A′B′ situés sur le trajet du faisceau d'électrons.



Le couple AB de plaques verticales peut amener une déviation du spot dans la direction horizontale $x'\,x$ pour une différence de potentiel U_x entre les plaques. Le couple A′B′ de plaques horizontales provoque une déviation verticale du spot, dans la direction $y'y$ pour une différence de potentiel U_y entre ses plaques.



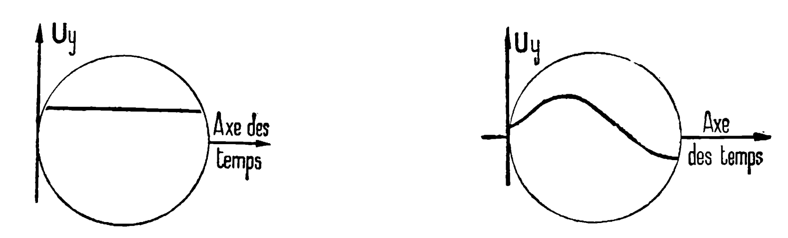
Des tensions variables U_x et U_y appliquées respectivement aux deux paires de plaques *feront décrire au spot des courbes* sur l'écran.

5. — BALAYAGE HORIZONTAL

Un dispositif accessoire livré avec le tube, agissant sur la tension des plaques verticales AB, permet d'obtenir des *déplacements du spot, suivant $x'\,x$, à vitesse constante et réglable.*

Si la seconde paire de plaques A′B′ n'est pas utilisée, le spot décrit périodiquement l'axe $x'x$, dans le même sens, à vitesse suffisante et à intervalles de temps assez rapprochés pour que l'impression lumineuse soit continue.

Si les plaques A′B′ sont soumises à la tension U_y, *la courbe décrite par le spot renseignera sur les variations de cette tension en fonction du temps.*



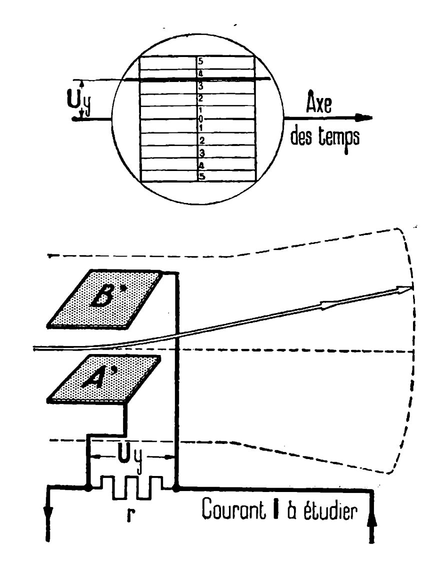
Un oscilloscope muni d'un commutateur spécial permet la représentation sur l'écran de plusieurs phénomènes à comparer.

6. — USAGES DE L'OSCILLOSCOPE

a. Le ***faisceau d'électrons***, ne présentant sensiblement pas d'inertie, ***peut effectuer des mouvements très rapides*** (par exemple, mouvements changeant de sens plusieurs millions de fois par seconde), aucun équipage mécanique mobile ne peut réaliser cette condition.

b. L'appareil muni d'une *échelle transparente* graduée, placée sur l'écran, peut servir d'***instrument de mesure après étalonnage.***

L'élongation dans la direction $y'y$ (avec ou sans balayage horizontal) correspond à une tension U_y entre les plaques A′B′, l'appareil constitue donc un ***voltmètre*** qui laisse parfaitement ouvert le circuit de mesure ou le générateur étudié.



c. L'oscilloscope peut être utilisé en ***ampèremètre***, les plaques A′B′ sont alors montées en dérivation aux bornes d'une résistance faible *r* constante, connue, parcourue par le courant étudié.

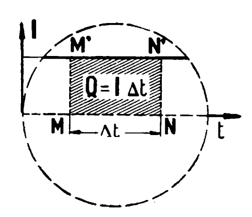
La résistance r est branchée sur l'oscilloscope comme un shunt d'ampèremètre.

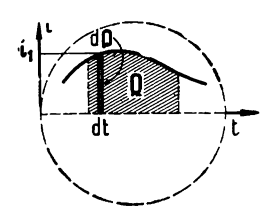
Entre les bornes de la résistance, le courant à étudier est $I = \frac{U}{r}$, I et U sont proportionnels.

Dans le cas où I est constant, le spot décrit (avec balayage horizontal) une parallèle à $x'x$, dont l'élongation donne la mesure du courant sur l'échelle étalonnée.

Remarque.

Pour un intervalle de temps Δt correspondant au segment MN de l'axe des temps $x'x$, la quantité d'électricité $Q = I\,\Delta t$, pour I constant, est représentée par l'aire du rectangle MNN'M'.





On peut généraliser cette notion, pour un courant variable i, la quantité d'électricité Q est représentée par l'aire comprise entre la courbe et l'axe des temps.

Cette aire est considérée comme la somme des aires de petits rectangles élémentaires, de largeur dt, intervalle de temps très court, pendant lequel le courant est sensiblement constant.

Télévision.

Les appareils récepteurs de télévision utilisent un tube cathodique. Le faisceau d'électrons dont l'intensité est modulée balaye très rapidement l'écran et y détermine des régions plus ou moins éclairées, reproduisant les images transmises.

Radar.

Un faisceau d'ondes courtes dirigées de très courte durée se réfléchit sur un obstacle et fournit, au retour, un signal, écho du signal émis.

L'intervalle de temps qui sépare les deux signaux est fonction de la distance de l'obstacle dans la direction considérée ($t = \frac{2}{v}d$, d distance, v vitesse de propagation des ondes).

Un oscilloscope cathodique, à balayage convenable, associé à l'émission et à la réception, représente sur son écran ces signaux par des perturbations sur la trajectoire du spot (radiale ou circulaire).

La distance qui sépare, sur l'écran, le signal émis et son écho mesure, à une échelle convenable, la distance d de l'obstacle au poste d'émission.

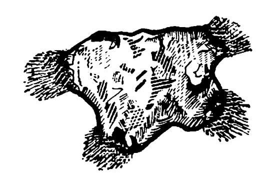


17. — Magnétisme

I. — LES AIMANTS

1. — AIMANTS NATURELS

Certains corps appelés aimants ont la propriété d'attirer des particules de fer.



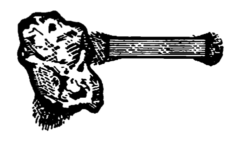
Certains échantillons naturels d'oxyde de fer Fe_3O_4 (appelé alors oxyde magnétique) agissent de même.

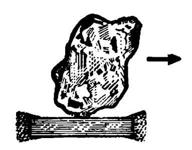
Cette propriété est localisée en certaines régions de l'échantillon, appelées *pôles.*

2. — AIMANTS ARTIFICIELS

Au contact, ou à proximité d'un aimant, un barreau de fer acquiert la même propriété : *il s'aimante par influence.*

Il perd cette propriété dès que l'aimant qui l'a influencé est éloigné ; ce morceau de fer a été un *aimant temporaire.*





En répétant l'expérience avec un barreau d'acier, surtout si on le frotte longitudinalement avec un pôle de l'aimant naturel, le barreau d'acier devient un aimant permanent : il conserve la propriété après l'éloignement de l'aimant influençant.

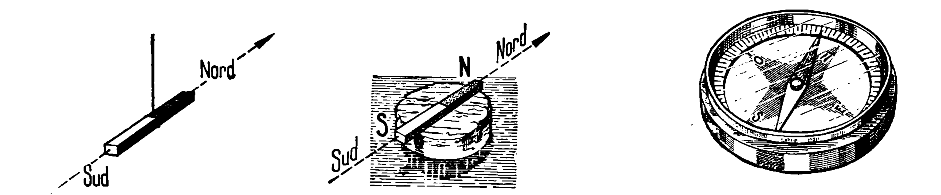
L'acier conserve du magnétisme rémanent.

II. — PROPRIÉTÉS DES AIMANTS PERMANENTS

1. — POLES

Un barreau long aimanté retient des touffes de limaille de fer au voisinage de ses extrémités ; ces deux régions sont les pôles de l'aimant et sont séparées par une zone neutre.

Un aimant long, rectiligne, *suspendu* ou placé sur un flotteur, susceptible de pivoter dans un plan horizontal, *s'oriente dans une direction voisine de la direction nord-sud géographique.*



Le même pôle toujours placé vers le nord est le ***pôle nord N*** de l'aimant, l'autre est le ***pôle sud S.***

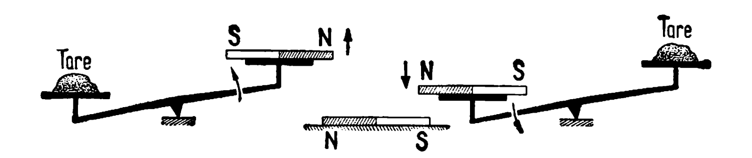
Il en est de même de la ***boussole***, légère aiguille d'acier aimantée, montée sur pivot, se déplaçant en face d'un cadran dans un plan horizontal.

2. — FORCES MAGNÉTIQUES

En approchant l'un de l'autre deux pôles d'aimants, nous constatons :

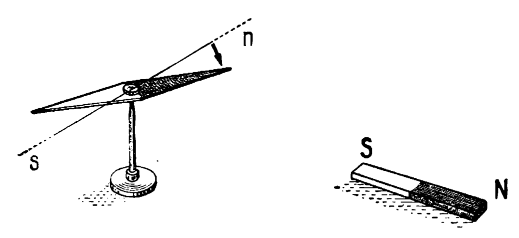
— qu'ils ***se repoussent s'ils sont de même nom*** ;

— qu'ils ***s'attirent s'ils sont de noms contraires.***



Cette force d'attraction ou de répulsion réciproque sensible quand les deux pôles sont rapprochés, décroît très vite quand leur distance augmente.

L'action des deux pôles d'un aimant sur ceux d'une boussole placée à proximité provoque une déviation de celle-ci par rapport à sa position d'équilibre.



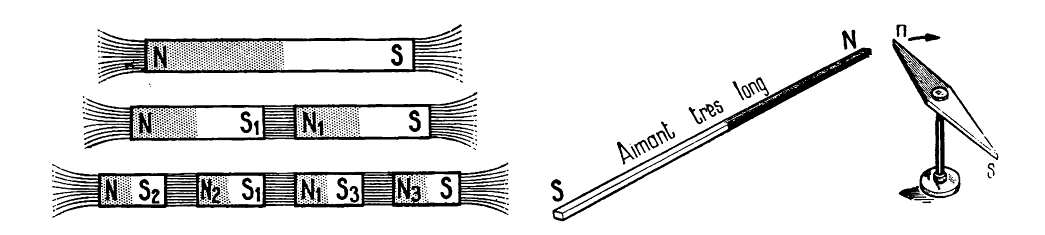
3. — AIMANT BRISÉ

Soit un aimant long NS, scié en deux parties dans le sens transversal ; si nous séparons les deux parties, nous constatons *l'apparition de pôles complémentaires des précédents* S_1 et N_1, de part et d'autre de la coupure.

Chaque partie est devenue un aimant complet à deux pôles N,S_1 et N_1,S.

En poursuivant ce fractionnement, sur chaque portion apparaissent de nouveaux pôles complémentaires des précédents.

Si petit soit-il, chaque nouvel aimant présente deux pôles, un pôle nord et un pôle sud.



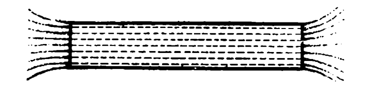
On ne peut donc pas isoler un pôle.

Dans la pratique, si nous voulons utiliser un seul pôle, nous prendrons un aimant très long, l'action perturbatrice du pôle éloigné sera peu sensible.

La reconstitution de l'aimant primitif, par approche de ses éléments, fait disparaître les pôles intermédiaires.

4. — INTERPRÉTATION

Le magnétisme est un phénomène moléculaire ; à la cohésion et à la densité près, le corps de l'aimant et la houppe de limaille qu'il soutient ont la même structure.



Les grains de limaille, aimantés par influence, s'accrochent les uns aux autres par attraction des pôles de noms contraires.

L'aimant, lui aussi, est composé d'un très grand nombre de petits éléments (appelés dipoles) mis bout à bout, en séries juxtaposées.

Les molécules d'un aimant sont aimantées, l'aimantation intéresse donc tout le métal et non seulement les pôles où apparaissent les manifestations extérieures de l'aimantation.

Dans un morceau de fer ou d'acier non aimanté, les molécules constituent des aimants permanents, mais orientés de façon quelconque : ils ne manifestent aucune résultante notable pour l'extérieur. Il en serait ainsi d'un tas de petits aimants maintenus en tous sens.

L'aimantation oriente seulement les aimants particulaires dans la même direction ; cela fait apparaître à notre échelle une propriété qui n'était pas perceptible sur la particule élémentaire.

Lorsque tous les aimants particulaires sont orientés, les propriétés magnétiques ne peuvent plus s'accroître ; l'expérience montre qu'en effet il y a une **saturation magnétique**.

5. — CORPS MAGNÉTIQUES

Un aimant n'attire pas seulement le fer, mais encore la fonte, l'acier, d'autres alliages ferreux et, à un degré moindre, le nickel, le cobalt.

De telles substances sont dites magnétiques ou ferromagnétiques.

L'attraction d'un aimant peut s'effectuer à travers des corps tels que : feuille de verre, de carton... corps non magnétiques.

6. — STABILITÉ DE L'AIMANTATION RÉMANENTE

Certaines causes font disparaître l'aimantation rémanente :

a. **l'agitation thermique :** un aimant chauffé vers 800° perd toute propriété magnétique ;

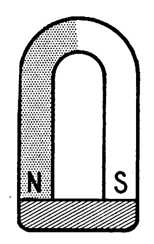
b. **des actions magnétiques** provoquent une autre orientation moléculaire et peuvent réduire ou annuler l'aimantation initiale ;

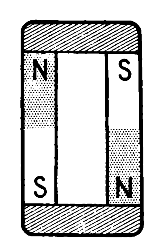
c. **les chocs, les vibrations** et les modifications chimiques peuvent aussi intervenir.

On peut favoriser la conservation de l'aimantation rémanente :

a. en incorporant au fer certains éléments étrangers (carbone, nickel, tungstène, cobalt, aluminium). On réalise ainsi des alliages convenant très bien à la confection d'**aimants permanents** ;

b. en réunissant les pôles d'un aimant par une **armature de fer** (ou d'acier) qui supprime l'existence des pôles libres.





En effet, les lignes de limaille, qui s'épanouissent à la sortie d'un pôle, montrent que les aimants moléculaires des extrémités polaires sont moins bien rangés (ils ne sont maintenus par les autres que d'un seul côté) ; la désaimantation d'un barreau commence par les extrémités.

III. — CHAMP MAGNÉTIQUE

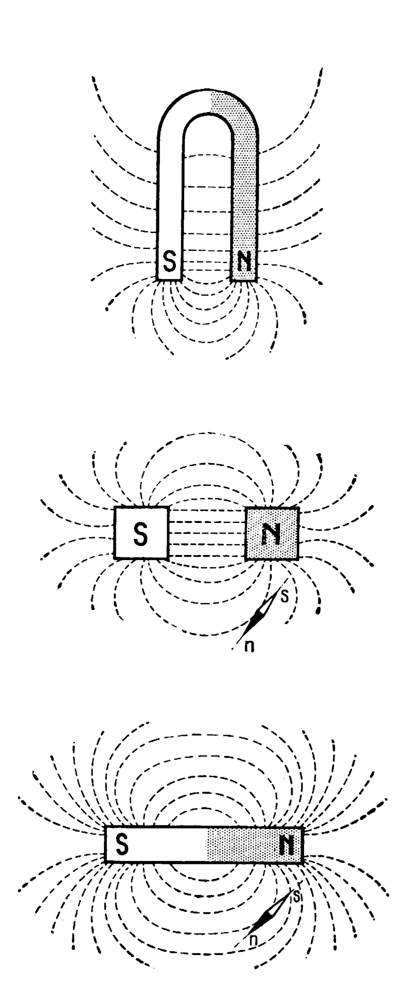
1. — DÉFINITION

Dans l'espace qui environne un aimant, tous les autres aimants subissent l'action de forces magnétiques. On dit que cet ***espace est le siège d'un champ magnétique.***

La terre, qui oriente la boussole, produit un champ magnétique. Nous vivons dans le champ magnétique terrestre.

2. — SPECTRES MAGNÉTIQUES

On désigne sous ce nom les figures que l'on obtient en saupoudrant de limaille de fer un carton (ou une feuille de verre) mince placé à plat sur l'aimant ou le système d'aimants étudiés. De petits chocs imprimés au carton favorisent la mobilité des grains de limaille.



Les grains de limaille s'aimantent par influence dans le champ magnétique étudié, deviennent l'objet de forces magnétiques et se disposent dans chaque cas suivant un ensemble de lignes.

Ces lignes sont plus serrées au voisinage des pôles et s'épanouissent dans l'espace. Elles dessinent le spectre magnétique de l'aimant.

Une courte aiguille aimantée sur pivot, jouant un rôle semblable à celui d'un grain de limaille mobile, ***tend à se placer tangentiellement à la ligne passant par son centre.***

IV. — MAGNÉTISME TERRESTRE

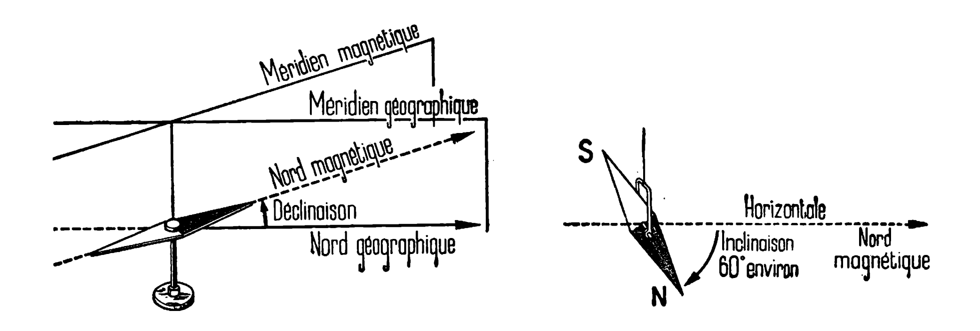
1. — DÉCLINAISON

Nous avons signalé l'effet directeur du champ magnétique terrestre sur la boussole.

La direction Sud-Nord de cette boussole ne coïncide pas exactement avec la direction Sud-Nord géographique.

L'angle que fait la direction de l'aiguille avec le plan du méridien géographique du lieu est la déclinaison d.

Le plan défini par la verticale et la direction de l'aiguille aimantée est le plan du méridien magnétique du lieu.



2. — INCLINAISON

Une aiguille aimantée, suspendue par un étrier à un fil sans torsion, s'oriente dans le plan du méridien magnétique du lieu et, à Paris, *s'incline sur l'horizontale d'un angle voisin de 60° appelé inclinaison* **i.**

3. — VARIATIONS

La déclinaison et l'inclinaison varient :

a. **Avec le lieu.**

Cependant, pour une zone de faibles dimensions (quelques kilomètres), la direction du champ terrestre (celle de l'aiguille aimantée) est pratiquement constante.

On dit que le champ terrestre considéré dans cette zone est uniforme.

b. **Dans le temps.**

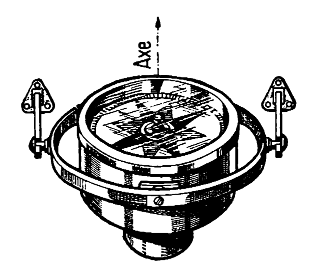
La *déclinaison* varie d'environ 10′ par an (oscillation complète de 22° de part et d'autre du Nord géographique en sept siècles).

La déclinaison subit, en outre, des *oscillations journalières* de quelques minutes autour d'une position moyenne, et des *variations accidentelles* dues aux orages magnétiques, phénomènes qui apparaissent en même temps que les aurores boréales et les taches solaires.

Actuellement, en France, la déclinaison est occidentale, elle varie de 5° à 10° environ, d'Est en Ouest ; elle est en période décroissante.

4. — APPLICATION

Le *Bureau des longitudes de Paris* publie périodiquement les valeurs de la déclinaison pour toutes les régions du globe terrestre.



Ces valeurs sont utilisées par les navigateurs marins et aériens, qui utilisent le *compas*.

Remarque.

Toute mesure de direction, faite à l'aide de la boussole ou du compas, peut être influencée par des causes perturbatrices : voisinage de fer ou de corps magnétiques, proximité des lignes électriques (effet magnétique du courant).



18. — Propriétés magnétiques du courant

I. — ACTION DU COURANT SUR UN AIMANT

Un conducteur, tendu parallèlement à une aiguille aimantée, montée sur pivot, la fait dévier lorsqu'il est parcouru par un courant (leçon 4, § 2).

Il crée donc un champ magnétique et ce phénomène polarisé a permis :

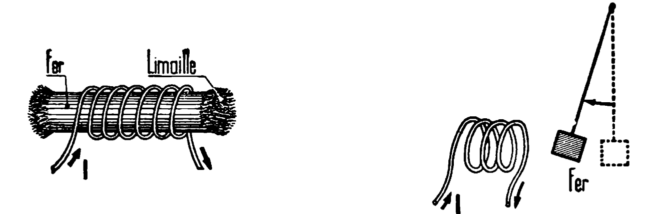
— de reconnaître le sens du courant, règle de l'observateur d'Ampère (leçon 4) ;

— de construire des ampèremètres à aimant mobile (leçon 5).

2. — ACTION SUR UN BARREAU DE FER OU D'ACIER

a. Un barreau de fer ou d'acier s'aimante lorsqu'il est placé au voisinage ou, mieux, à l'intérieur d'un enroulement parcouru par un courant.

Ce procédé est utilisé industriellement pour l'obtention d'aimants temporaires (en fer doux) ou permanents (en acier).



b. Un enroulement, parcouru par un courant, agit sur une pièce de fer mobile comme le ferait un aimant.

3. — SPECTRES MAGNÉTIQUES DES COURANTS

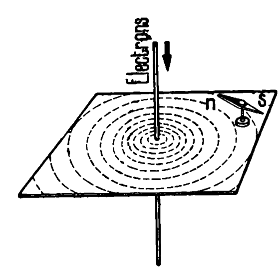
La limaille de fer permet de réaliser le spectre magnétique des courants comme celui des aimants.

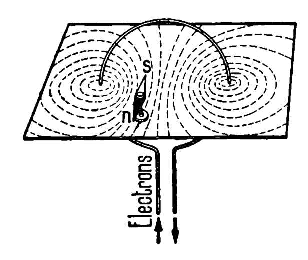
Voici quelques cas particuliers :

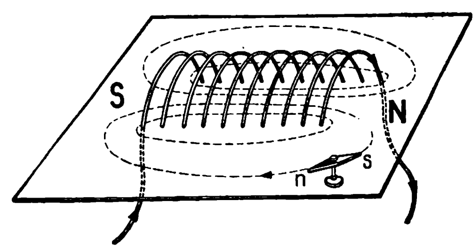
a. Courant rectiligne : spectre dans un plan perpendiculaire au conducteur.

b. Bobine plate : spectre dans un plan passant par l'axe de la bobine.

c. Bobine longue : spectre dans un plan passant par l'axe.





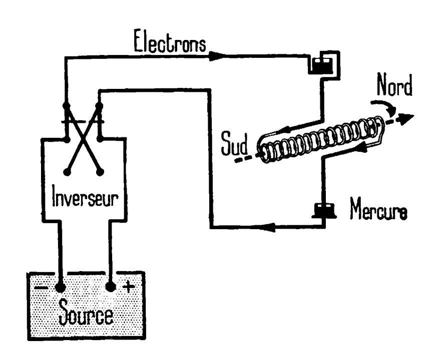


A l'extérieur de la bobine, nous retrouvons ici une configuration analogue à celle du spectre magnétique d'un aimant long.

A l'intérieur de la bobine, les lignes du spectre sont parallèles, le champ est uniforme.

4. — ORIENTATION D'UNE BOBINE DANS LE CHAMP TERRESTRE

Une bobine longue, mobile autour d'un axe vertical (perpendiculaire à son axe), s'oriente comme un barreau aimanté dans le champ magnétique terrestre. Elle présente une face Nord et une face Sud.



La polarité des faces d'une bobine peut se reconnaître par l'action (attraction ou répulsion) qu'elle exerce sur un pôle connu d'une aiguille aimantée mobile.

La polarité de ses faces dépend :

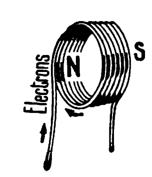
a. du sens du courant qui la parcourt. La manœuvre de l'inverseur provoque une rotation face pour face de 180° ;

b. du sens de l'enroulement de ses spires (sens du pas de vis qu'elles constituent, pas à gauche ou à droite).

Cette propriété est mise en évidence avec deux bobines enroulées en sens inverses et alimentées en série.

Ces deux constatations permettent de préciser la polarité des faces.

Règle (1).



La face Nord d'une bobine est celle en regard de laquelle il faut se placer pour voir le courant des électrons tourner dans le sens trigonométrique négatif, c'est-à-dire dans le sens de rotation des aiguilles d'une montre.

5. — CONSÉQUENCE

Action mutuelle de deux bobines :

l'attraction ou la répulsion réciproque de deux faces polaires est analogue aux actions réciproques des pôles d'aimants.

6. — CONCLUSION

Le courant électrique crée, au voisinage des conducteurs, un champ magnétique, c'est-à-dire une zone où son action magnétique est sensible.

Le magnétisme des aimants et celui qui résulte du courant sont de même nature.

Nous avons signalé au début du cours la gravitation des électrons autour du noyau de l'atome ; ces électrons en mouvement constituent de véritables courants électriques. Nous admettons que chaque atome de substance magnétique (fer ou acier), à une échelle convenable, constitue en quelque sorte une bobine (les spires seraient figurées par les orbites électroniques).

Quand les axes de rotation des électrons sont orientés parallèlement à une direction privilégiée, le corps constitue un aimant.

On peut donc considérer le magnétisme des aimants comme produit par des courants.

---

(1) Si l'on emploie le sens conventionnel du courant, la face Nord de la bobine est celle devant laquelle il faudrait se placer pour voir tourner le courant dans le sens trigonométrique positif.



19. — Induction électromagnétique [1]

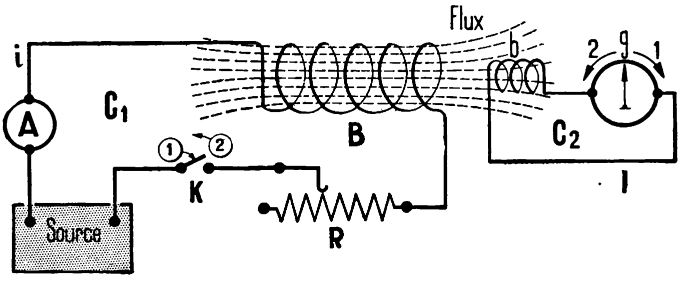
I. — ÉTUDE QUALITATIVE

I. — EXPÉRIENCES FONDAMENTALES

Nous disposons de deux circuits indépendants :

— le circuit C_1 comporte une bobine B alimentée par l'intermédiaire d'un rhéostat de réglage R et d'un interrupteur K ;

— le circuit C_2 comprend une bobine *b*, de quelques spires, fermée sur un galvanomètre *g* (appareil très sensible qui décèle le passage du courant et repère son sens).



Les bobines B et *b* sont placées sur un même axe, dans l'air, au voisinage l'une de l'autre.

Première expérience.

a. A la fermeture de l'interrupteur K, lorsque le courant *i* s'établit dans le circuit C_1, nous constatons *une déviation temporaire* du galvanomètre *g*, dans un certain sens (sens 1).

b. Faisons croître le courant *i*, par exemple en diminuant rapidement la résistance R : le galvanomètre subit une *nouvelle déviation temporaire*, de même sens.

c. Rapprochons rapidement les deux bobines B et *b* : *nouvelle déviation temporaire* toujours de même sens.

Entre chaque manœuvre, la bobine *b* n'est parcourue par aucun courant.

---

(1) Phénomène découvert en 1851 par Faraday, physicien anglais (1791-1867).

Deuxième expérience.

a. Éloignons rapidement l'une de l'autre les deux bobines B et *b*.

b. Faisons décroître rapidement le courant *i* dans le circuit C_1 (par augmentation de la résistance R).

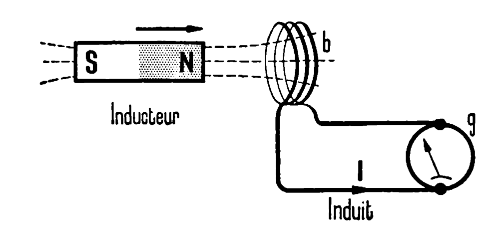
c. Coupons le courant *i*.

Dans chacun de ces trois cas, nous constatons des *déviations du galvanomètre*, de courte durée, en sens inverse (sens 2) de celles constatées précédemment.

Entre chaque manœuvre, la bobine *b* n'est parcourue par aucun courant.

Troisième expérience.

On obtient les mêmes phénomènes d'induction électromagnétique par déplacement d'un pôle d'aimant en face de la bobine *b*.



2 — DÉFINITIONS

a. Ce phénomène, apparition du courant temporaire I dans le circuit C_2, sans liaison par conducteur avec le circuit C_1, est appelé ***induction électromagnétique.***

b. Le courant I qui apparaît dans la bobine *b* est le ***courant induit***; il a pour cause une ***force électromotrice induite*** dans le circuit C_2, appelé ***circuit induit*** (en abrégé : *b*, induit).

c. Le circuit C_1 est appelé ***circuit inducteur*** (en abrégé : B, inducteur), le courant *i* qui parcourt ce circuit est le ***courant inducteur.***

Un aimant qui provoque (par déplacement) le phénomène d'induction dans la bobine *b* est aussi *un inducteur.*

d. **Flux magnétique.**

L'inducteur et l'induit n'ont pas de liaison matérielle visible; cependant il y a eu une action de l'inducteur B sur l'induit *b*. Il existe donc une liaison d'une nature que nous n'avons pas encore rencontrée ; ***cette liaison est désignée sous le nom de flux d'induction magnétique*** (en abrégé : flux magnétique).

L'idée de flux magnétique a été suggérée par l'observation de divers phénomènes tels que :

— ***les actions magnétiques*** qui sont exercées à distance, soit par un aimant, soit par un courant, dans une certaine région de l'espace ;

— ***l'aspect du spectre magnétique*** d'un aimant ou d'une bobine.

Le mot flux, qui signifie étymologiquement écoulement, circulation, est souvent employé par les physiciens ; par exemple, une source lumineuse agit à distance sur un objet, elle l'éclaire : elle émet un flux lumineux dans sa direction.

Dans le cas qui nous intéresse, nous dirons que ***l'aimant ou la bobine B émettent un flux magnétique à travers l'espace occupé par leur champ magnétique.***

Le flux magnétique est une grandeur mesurable que l'on désigne par Φ (se lit *phi*).

Cette hypothèse du flux magnétique facilite l'explication de nombreux phénomènes électromagnétiques et permet en particulier de déterminer les dimensions à donner aux organes constitués avec des matériaux magnétiques.

3. — INTERPRÉTATION DU PHÉNOMÈNE

Le flux magnétique émis par l'inducteur B à travers l'induit *b* a pour cause le courant inducteur *i* qui parcourt la bobine B.

On peut admettre que ce flux dépend du courant inducteur et des conditions géométriques de l'expérience (dimensions et position relative de B et *b*).

Les bobines B et *b* étant maintenues immobiles, et le courant inducteur *i* constant, le flux émis par B à travers *b* est lui-même constant.

Or, dans ces conditions, nous n'avons constaté aucun courant induit dans la bobine *b* en circuit fermé, donc aucune force électromotrice induite.

Ce n'est pas le flux magnétique lui-même qui est la cause de la force électromotrice induite constatée dans les expériences antérieures.

Par contre :

a. L'***établissement*** du courant *i* dans le circuit C_1, l'***augmentation*** de ce courant, le ***rapprochement*** de B et *b* entraînent une ***augmentation du flux*** émis par B à travers *b*.

b. La ***coupure*** du courant *i*, la ***diminution*** de ce courant, l'***éloignement*** de B et *b* entraînent une ***diminution de ce flux.***

Nous sommes donc conduits à l'énoncé suivant :

Loi du flux embrassé.

Pour qu'une force électromotrice induite apparaisse dans un circuit, il est nécessaire que le flux magnétique à travers ce circuit présente une variation.

Lorsque l'accroissement du flux embrassé donne une force électromotrice d'un certain sens, la diminution du flux embrassé produit une force électromotrice de sens contraire.

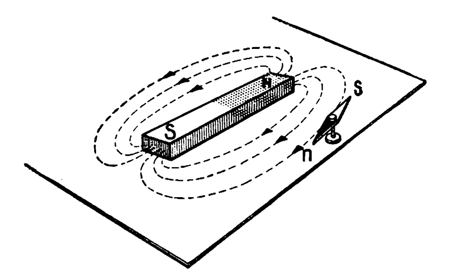
II. — FLUX MAGNÉTIQUE : GRANDEUR ALGÉBRIQUE

1. — ORIENTATION DU FLUX MAGNÉTIQUE

Par convention on admet que le flux magnétique émis par un aimant ou une bobine est issu de la face nord, s'épanouit extérieurement dans l'espace, retourne à la face sud et ferme son circuit à l'intérieur de l'aimant ou de la bobine.

Sur les spectres magnétiques, l'aiguille aimantée se place tangentiellement à la ligne de flux qui passe en son centre.

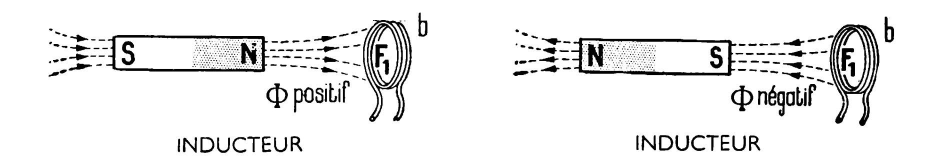
En orientant cette ligne de flux dans le sens $\overrightarrow{sn}$ de l'aiguille aimantée, nous retrouvons le sens conventionnel du flux.



2. — CONVENTION DE SIGNE

Le flux étant orienté, nous sommes amenés à considérer, pour une face de référence F_1 d'une bobine induite *b* :

— comme positif, le flux qui pénètre dans la bobine par cette face F_1 ;
— comme négatif, le flux qui sort de la bobine par cette face.



Le flux qui traverse la bobine *b* sera considéré comme une grandeur algébrique.

3. — EXPÉRIENCE

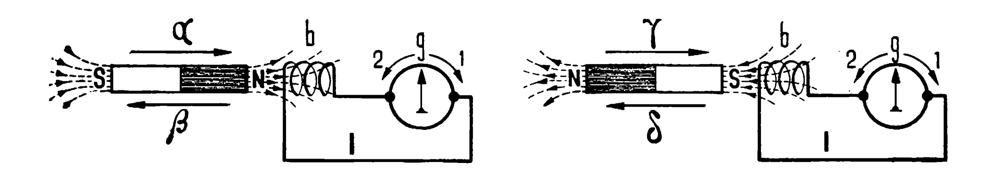
Reprenons l'expérience d'induction électromagnétique avec un aimant inducteur NS, la bobine *b* maintenue immobile.

α. L'approche du pôle N de l'aimant en regard de la face F_1 de la bobine *b* provoque dans celle-ci l'apparition d'un *courant induit* temporaire *d'un certain sens* (sens 1).

β. L'éloignement de ce pôle N produit un *courant induit* temporaire *de sens inverse* (sens 2).

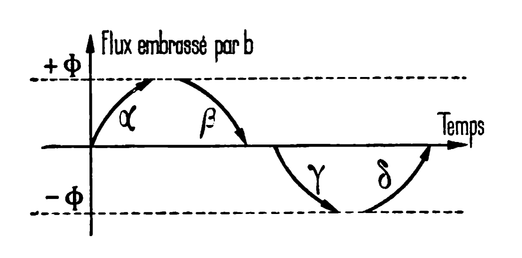
γ. L'approche du pôle S de l'aimant en regard de la face F_1 de la bobine produit un courant induit temporaire de sens 2.

δ. L'éloignement de ce pôle S produit un courant induit temporaire de sens 1.



4. — INTERPRÉTATION

Désignons par Φ la mesure du flux que le pôle N émet à travers la bobine *b* quand ce pôle N est très près de la face F_1, les quatre cas envisagés correspondent à des variations de flux représentées schématiquement par des courbes α, β, γ, δ (sans en préciser la forme) :



— pour α, le flux émis à travers *b* par la face F_1 croît de 0 à $+\Phi$;

— pour β, il décroît de $+\Phi$ à 0 ;

— pour γ, il décroît de 0 à $-\Phi$;

— pour δ, il croît de $-\Phi$ à 0.

(Le flux est nul quand l'aimant est assez loin de la bobine *b*, qui est alors hors du champ magnétique.)

A un flux croissant, en valeur algébrique (cas α et δ), correspond un courant induit de sens 1.

A un flux décroissant, en valeur algébrique (cas β et γ), correspond un courant induit de sens 2.

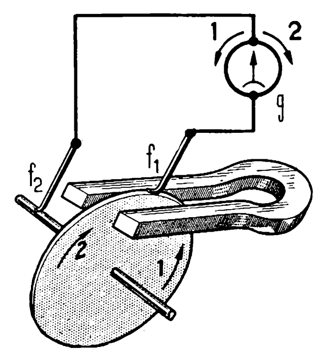
Conclusion.

Le sens du courant induit, c'est-à-dire le sens de la force électromotrice d'induction, dépend du sens de la variation du flux (considéré comme grandeur algébrique), émis par l'inducteur à travers l'induit.

III. — AUTRE FORME DE LA LOI DE L'INDUCTION

1. — EXPÉRIENCE

Il est des cas où l'on peut faire apparaître un courant induit sans pouvoir préciser la variation du flux à travers cet induit.



Entre les pôles d'un aimant en fer à cheval un disque métallique tourne dans un certain sens.

Deux balais, f_1 sur la circonférence, f_2 sur l'axe. sont reliés au galvanomètre g qui indique le passage d'un courant induit.

Le sens de ce courant dépend du sens de rotation du disque.

Il n'est pas possible de dire ici que le flux embrassé varie.

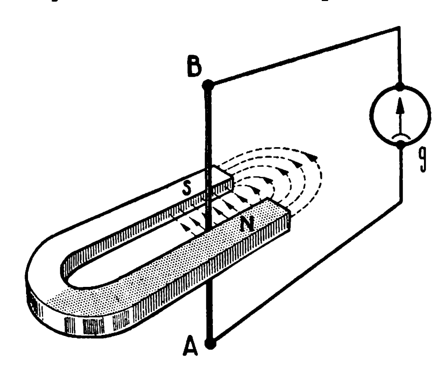
2. — LOI DU FLUX COUPÉ (1)

Elle traduit le phénomène d'induction électromagnétique d'une manière plus générale que la loi du flux embrassé.

Pour qu'il y ait une force électromotrice induite dans un circuit, il est nécessaire qu'une portion, au moins, de conducteur coupe du flux magnétique.

Les forces électromotrices induites sont localisées dans les portions de conducteur qui coupent du flux.

Le sens de ces forces électromotrices, pris sur le conducteur intéressé, dépend du sens dans lequel celui-ci se déplace par rapport au flux.



3. — VÉRIFICATION

Nous disposons d'un aimant inducteur (en fer à cheval) que l'on déplace en face d'un élément rectiligne fixe AB, faisant partie d'un circuit fermé sur un galvanomètre g.

Les autres éléments du circuit sont supposés hors du champ magnétique de l'aimant.

(1) Loi énoncée en 1914 par Blondel, savant français (1863-1938).

a. ***Tant que les déplacements de l'inducteur ne font pas couper les lignes de flux par l'élément AB, aucun courant n'est décelé par g.***

Exemple : translation parallèle à AB,
translation parallèle aux lignes du flux,
rotation autour de l'axe AB.

b. ***Un déplacement quelconque, qui fait couper du flux par AB, amène une déviation temporaire du galvanomètre g***; il produit donc une force électromotrice induite dans l'élément AB.

A des déplacements opposés correspondent des courants induits de sens opposés.

Remarque.

De ces deux lois, loi du flux embrassé par le circuit induit et loi du flux coupé par un conducteur actif de l'induit, nous emploierons celle qui conduit à l'interprétation et à la solution la plus simple.

Ces deux lois traduisent, en général, le même phénomène

EXERCICES

1 — Entre les deux pôles d'un aimant en U, une bobine plate circulaire pivote autour d'un de ses diamètres perpendiculaire à la direction du flux dans cette région.
Le mouvement est continu, que peut-on dire de la polarité de la force électromotrice induite et du sens du courant induit si la bobine est en circuit fermé ? (On a réalisé une magnéto à induit tournant.)

2 — Mêmes questions si l'on fait pivoter un aimant en face d'une bobine de manière que les pôles de l'aimant défilent tour à tour devant une face de la bobine. (On a réalisé une magnéto à aimant tournant.)

3 — Dans un barreau métallique qui tombe apparaît, en général, une force électromotrice induite. Pourquoi ?
Dans quel cas, au cours de ce mouvement, aucune force électromotrice induite n'apparaît ?



20. — Loi quantitative de l'induction électromagnétique

I. — ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

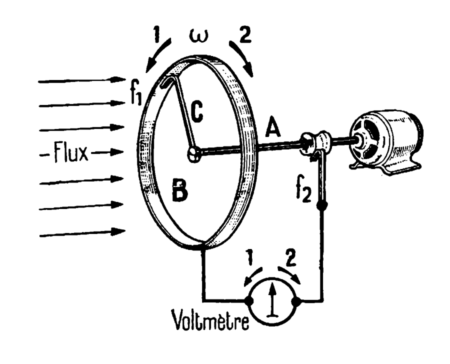
I. — EXPÉRIENCE

Pour mesurer la force électromotrice induite E, cause du courant I, il faut laisser le circuit induit ouvert. Dans ce cas, la force électromotrice de cet induit est égale à la tension U_0 aux bornes de la coupure.

L'oscilloscope cathodique, utilisé en voltmètre, permet la mesure en circuit ouvert. Un voltmètre très résistant (mais très sensible) peut, pratiquement, convenir.

a. **Montage.**

Soit un conducteur rigide, rectiligne C, fixé perpendiculairement à l'arbre A d'un moteur qui l'entraîne *à vitesse angulaire constante* ω, mesurable ; le conducteur C porte un balai f_1 qui frotte sur une bague B fixe, située dans le plan de la rotation.



Le système est placé dans un *champ uniforme* (par exemple à l'intérieur d'une bobine de grandes dimensions, leçon 19), de manière que le conducteur C coupe les lignes du flux.

L'appareil de mesure, oscilloscope ou voltmètre, est branché entre la bague B et un balai f_2 qui frotte sur l'arbre A.

b. **Mesures.**

1° *Pendant la rotation à vitesse constante* ω, le circuit comprenant le conducteur C est le siège d'une force électromotrice induite E constante. Seul l'élément C coupe des lignes de flux, c'est l'élément actif du circuit.

2° *Pour différentes vitesses de rotation* $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \ldots$, nous mesurons des forces électromotrices induites $E_1, E_2, E_3, \ldots$, proportionnelles à ces vitesses de rotation. Nous pouvons écrire

$$\mathbf{E} = k_1\,\omega \quad (k_1 \text{ constante de proportionnalité}). \qquad (1)$$

3° *Inversons le sens de rotation*, le sens de la force électromotrice E change.

2. — CONCLUSION

Pour une vitesse angulaire ω constante, la surface balayée pendant un intervalle de temps t, par le conducteur C, est proportionnelle à ωt ; il en est de même du flux coupé Φ par ce conducteur ; on a donc :

$$\Phi = k_2 \omega t \qquad (2)$$

En divisant membre à membre les relations (1) et (2), on a :

$$\frac{E}{\Phi} = \frac{k_1}{k_2 t} \quad \text{en posant} \quad \frac{k_1}{k_2} = K \quad \frac{E}{\Phi} = \frac{K}{t},$$

soit

$$\mathbf{E} = \mathbf{K}\,\frac{\Phi}{t}$$

Φ *étant le flux uniformément coupé pendant le temps* t, nous pouvons énoncer :

La force électromotrice induite est proportionnelle au flux coupé par unité de temps.

— Nous n'avons pas fait intervenir le signe du flux ; cette relation s'applique aux valeurs absolues de Φ et de E.

— Le choix de la constante, $K = 1$, et celui des unités de force électromotrice, le volt, et de temps, la seconde, implique la définition de l'unité de flux ; la relation s'écrit :

$$\boxed{|\Phi| = |\mathbf{E}| \times t} \qquad (3)$$

3. — UNITÉ DE FLUX

C'est le flux qui, uniformément coupé par un conducteur en une seconde, produit dans ce conducteur une force électromotrice induite de 1 V.

Cette unité de flux est le weber (1 Wb) (1).

Les physiciens utilisent aussi une unité, rattachée au système C. G. S., le maxwell (1 Mx) (2), $1\text{ Wb} = 10^8\text{Mx}$.

---

(1) Weber, physicien allemand (1804-1891).
(2) Maxwell, physicien anglais (1831-1879).

Remarque.

L'étude de la force électromotrice induite dans une spire, par variation du flux embrassé par cette spire, conduit à la même expression $|\Phi| = |E| \times t$.

Ici $|\Phi|$ est la valeur absolue de la variation uniforme de flux pendant le temps t.

Cette étude fournit la *définition légale du weber.*

Le weber est le flux magnétique qui, traversant un circuit d'une seule spire, y produirait une force électromotrice d'induction de 1 V si on l'amenait à zéro en une seconde, par décroissance uniforme.

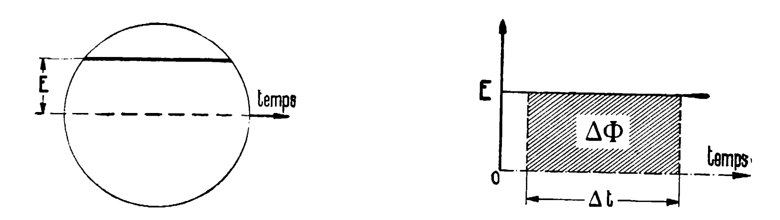
II. — REPRÉSENTATION GRAPHIQUE

I. — EXEMPLE SIMPLE

Reprenons l'expérience précédente, avec un oscilloscope à balayage horizontal ; il donne une représentation de la force électromotrice E en fonction du temps t.

Nous obtenons, à vitesse angulaire constante, une droite parallèle à l'axe des temps, représentant une force électromotrice E constante.

Pour un intervalle de temps Δt, correspondant au flux coupé $\Delta\Phi$, la relation (3) donne $|\Delta\Phi| = |E| \times \Delta t$



la mesure du flux coupé est fournie par celle de l'aire hachurée.

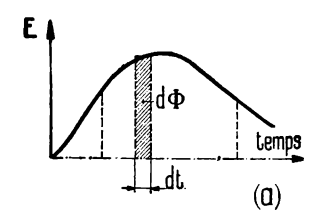
2. — CAS GÉNÉRAL

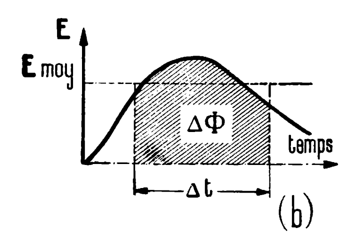
Si nous ***provoquons*** des variations de vitesse angulaire du conducteur C (par freinage variable du moteur) ou des variations du flux émis par la bobine inductrice (par modification du courant d'excitation), le flux coupé n'est plus proportionnel au temps. La force électromotrice induite E obtenue varie ; elle est représentée, en fonction du temps, par une courbe dont la forme dépend des variations de vitesse angulaire du conducteur C, ou des variations du flux émis par la bobine inductrice.

Considérons un intervalle de temps dt très court, pendant lequel nous pouvons supposer que les variations de la vitesse angulaire de C et du flux émis par l'inducteur sont négligeables ; la relation précédente appliquée au flux coupé $d\Phi$, pendant ce temps dt permet d'écrire :

$$|d\Phi| = |\mathbf{E}| \times dt, \quad \text{ou} \quad |\mathbf{E}| = \frac{|d\Phi|}{dt}$$

C'est l'expression de la loi générale qui donne la valeur absolue de la force électromotrice induite E à un instant donné (ou force électromotrice instantanée).



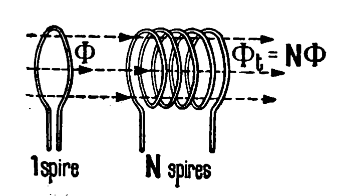


Des expériences précises ont montré que cette loi était applicable, quels que soit le mode ou la cause du balayage ou de la variation du flux :

$d\Phi$ est soit le flux total coupé pendant le temps dt par les conducteurs actifs de l'induit, soit la variation du flux total embrassé par l'induit.

Remarque.

Le flux Φ émis par un inducteur, à travers une bobine, traverse en général les N spires de celle-ci.



Si nous admettons que toutes ces spires embrassent le même flux, pour une variation $d\Phi$ pendant le temps dt, il apparaît dans chaque spire une force électromotrice $|e| = \frac{|d\Phi|}{dt}$.

Ces N spires constituent des générateurs en série ; la force électromotrice induite dans la bobine est

$$|\mathrm{E}| = |\mathrm{N}e| = \frac{|\mathrm{N}d\Phi|}{dt},$$

l'expression $\mathrm{N}d\Phi$ est la variation du flux total $\Phi_t = \mathrm{N}\Phi$, embrassé par la bobine :

$$|\mathrm{E}| = \frac{|d\Phi_t|}{dt}$$

3. — FORCE ÉLECTROMOTRICE MOYENNE INDUITE

— Dans le cas général, $|d\Phi| = |E|\,dt$ exprime que la variation de flux $d\Phi$ est mesurée à très peu près par l'aire du rectangle élémentaire hachurée sur la figure (a) (en assimilant la courbe E à une suite de très petits paliers successifs, approximation légitime souvent utilisée).

— Pour un intervalle de temps notable Δt, la variation totale $\Delta\Phi$ du flux, somme de toutes les variations élémentaires $d\Phi$, sera représentée exactement par l'aire hachurée limitée par la courbe E et l'axe des temps pour l'intervalle Δt, figure (b).

— ***L'expression*** $|E_{moy.}| = \dfrac{|\Delta\Phi|}{\Delta t}$, ***définit la force électromotrice moyenne pendant cet intervalle de temps*** Δt.

Cette valeur $E_{moy.}$ est représentée par la largeur du rectangle, de longueur Δt et d'aire $\Delta\Phi$.

Remarque.

Cette définition de la force électromotrice moyenne induite est analogue à celle de la vitesse moyenne :

$$V_{moy} = \frac{\text{espace total } \Delta x}{\text{temps total } \Delta t}$$

tandis que la définition de la force électromotrice instantanée $|E| = \dfrac{|d\Phi|}{dt}$ correspond à celle d'une vitesse instantanée $v = \dfrac{dx}{dt}$ (pour un intervalle de temps dt, théoriquement infiniment petit, plus exactement, qui tend vers zéro).

Exemple.

Chaque spire d'une bobine qui en compte 200 est traversée par un flux de 10^{-4} Wb, ce flux s'annule en $\dfrac{1}{100}$ s.

Que peut-on dire de la force électromotrice induite ?

a. Si la variation du flux total à travers la bobine $\Delta\Phi_t = 10^{-4} \times 200$ est uniforme pendant le temps $\Delta t = \dfrac{1}{100}$ s,

la force électromotrice instantanée est constante et se confond avec la force électromotrice moyenne induite $|E| = \dfrac{|\Delta\Phi_t|}{\Delta t} = 2$ V

b. Si la variation $\Delta\Phi_t$ n'est pas uniforme, la force électromotrice induite n'est pas constante ; sa valeur moyenne $|E_{moy.}| = 2$ **V**

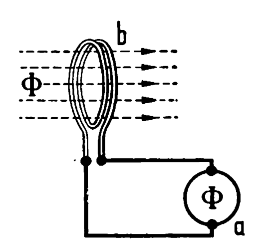
III. — MESURE D'UN FLUX

1. — REMARQUE

Dans le cas général, la variation $\Delta\Phi$ du flux est représentée par l'aire comprise entre la courbe E, l'axe des temps et les droites limites de Δt.

On peut obtenir le dessin fixe de la courbe E sur l'écran de l'oscilloscope en répétant à intervalles de temps réguliers, plusieurs fois par seconde, la même variation, mais la mesure graphique de $\Delta\Phi$ n'est pas utilisée dans la pratique.

2. — MESURE AU FLUXMÈTRE



a. Appareil.

Il comprend une ***bobine plate d'exploration***, ou ***bobine-sonde*** *b* de N spires identiques, qui joue le rôle d'induit soumis à une variation de flux $N\Phi$, et un appareil de mesure *a* (galvanomètre spécial) qui utilise le phénomène d'induction électromagnétique.

Le fluxmètre peut être gradué en webers ou en maxwells.

b. Utilisation.

La bobine-sonde placée en un point du champ magnétique étudié (plan des spires normal au flux) embrasse le flux total $N\Phi$.

Ce flux total varie de $N\Phi$ à zéro, soit en éloignant suffisamment la bobine-sonde de l'inducteur, soit en supprimant le courant d'excitation.

La déviation du fluxmètre mesure la variation du flux total $N\Phi$ embrassé par la bobine-sonde *b* dans le champ magnétique considéré.

On en déduit le flux Φ, à travers la surface d'une spire de *b*, en divisant par N l'indication du fluxmètre.

(On peut établir la graduation du fluxmètre en tenant compte d'un nombre de spires imposé N : on obtient, ainsi, un appareil à lecture directe.)

EXERCICES

1 — On réalise une magnéto élémentaire en faisant pivoter, en face d'une bobine plate présentant 800 spires, un aimant long NS de façon que chaque pôle de l'aimant passe alternativement devant cette face de la bobine, dont toutes les spires sont, ainsi, périodiquement traversées par tout le flux émis par l'aimant, soit 10^{-5} Wb. La vitesse de rotation de l'aimant étant de 600 tours par minute, calculer la force électromotrice moyenne induite dans la bobine pour 1/4 de tour de l'aimant à partir du flux maximum.

Réponse : 0,32 V.

2 — Une bobine plate, de diamètre moyen 6 cm, présentant 120 spires, est traversée par un flux uniformément réparti et normal à ses faces. Le flux utile qui traverse une spire moyenne est 5×10^{-5} Wb.

a. On fait pivoter cette bobine, en circuit ouvert, de $\frac{1}{4}$ de tour en 0,1 s, autour d'un de ses diamètres, calculer la force électromotrice moyenne induite.

b. Le circuit de cette bobine, réalisée en fil de cuivre isolé de diamètre utile 0,2 mm, de résistivité 1,6 $\mu\Omega$. cm²/cm, est fermé sur une résistance de 8,5 Ω. On recommence la rotation précédente ; en supposant que le flux émis par la bobine ne modifie pas le flux inducteur et n'agit pas sur la bobine elle-même, calculer le courant induit moyen au cours de l'opération et la quantité d'électricité induite

Réponses : 0,06 V ; 3 mA ; 300 μC.

3 — Une barre métallique de 2 m de longueur est guidée à ses extrémités par deux glissières conductrices verticales. Cette barre, restant horizontale, descend d'un mouvement rendu uniforme par freinage, à la vitesse de 3 m/s, dans un plan vertical perpendiculaire au méridien magnétique. On mesure, entre les glissières, une différence de 120 μV. Calculer le flux dû au magnétisme terrestre qui traverse chaque mètre carré du plan balayé par la barre.

Réponse : $2 \cdot 10^{-5}$ Wb.

4 — Sur le rotor (partie tournante) cylindrique d'une dynamo, un conducteur actif disposé suivant une génératrice coupe, à chaque demi-tour du rotor, un flux utile de 10^{-2} Wb émis par les inducteurs fixes.
Sachant que le rotor est entraîné à la vitesse de 1 800 tours par minute, calculer la force électromotrice moyenne induite dans un conducteur actif pour le demi-tour considéré.

Réponse : 0,6 V.

5 — Un cadre plat de 50 spires, de forme rectangulaire, de mêmes dimensions que la face nord d'un aimant qui émet un flux de 2×10^{-5} Wb, est placé en coïncidence avec cette face.
On fait glisser ce cadre parallèlement à l'un de ses côtés de façon à l'enlever du flux en 0,1 s. En utilisant :
a. la loi du flux embrassé,
b. la loi du flux coupe,
déterminer la force électromotrice moyenne induite dans ce cadre.

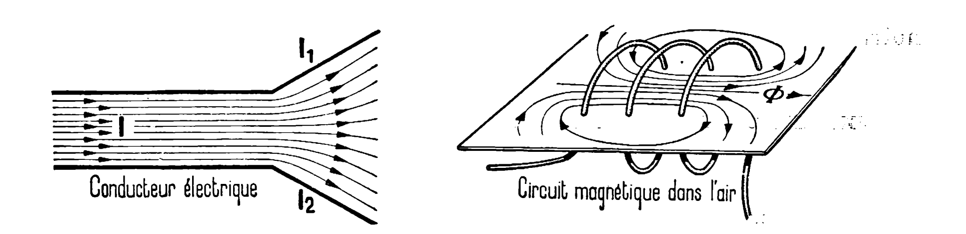
Réponse : 0,01 V.



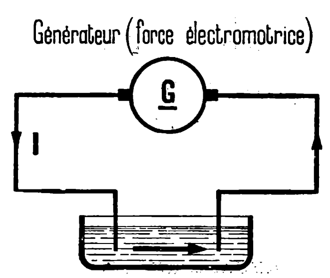
21. — Force magnétomotrice. Induction magnétique

I. — CIRCUIT ÉLECTRIQUE ET CIRCUIT MAGNÉTIQUE

On peut considérer les conducteurs d'un circuit électrique comme constitués par un très grand nombre de petits conducteurs filiformes associés en parallèle, chacun est parcouru par une fraction du courant, l'ensemble de ces conducteurs constitue le circuit électrique parcouru par le courant total I.

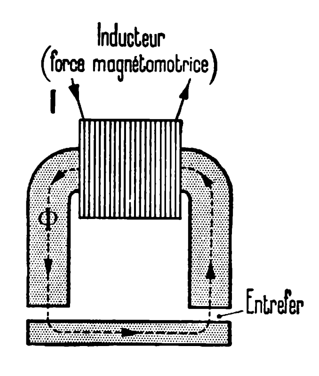


De même, les lignes du spectre magnétique d'un inducteur sont des « lignes de flux » ; leur ensemble constitue le flux total, et le circuit qu'elles effectuent est le circuit magnétique.



La région de l'espace, traversée par le flux, constitue le champ magnétique de l'inducteur; les effets magnétiques constatés : forces magnétiques et force électromotrice d'induction, sont liés à la présence du flux dans cette région.

Les circuits électriques peuvent être hétérogènes (conducteurs métalliques de nature et de



formes différentes, conducteurs liquides...) ; de même, le circuit magnétique peut comprendre des éléments de parcours très différents, à travers des matériaux quelconques, même le vide.

Dans les machines, les circuits magnétiques comportent des parcours assez longs dans le fer ou les matériaux dits magnétiques (fonte, aciers...) et courts dans l'air.

Un tel parcours dans l'air est appelé *entrefer*.

II. — FORCE MAGNÉTOMOTRICE

1. — DÉFINITION

Par analogie avec les phénomènes électriques, on admet que le flux magnétique, créé par une bobine, est dû à une force magnétomotrice, désignée par M.

Dans l'air, le flux créé (effet) est proportionnel à la force magnétomotrice (cause).

Les variations du flux sont donc proportionnelles à celles de la force magnétomotrice.

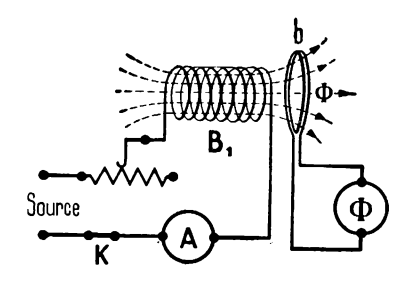
2. — EXPRESSION DE LA FORCE MAGNÉTOMOTRICE

a. Influence du courant inducteur.

Il est possible de mesurer au fluxmètre le flux émis, dans l'air, par la bobine inductrice B_1 (en utilisant une bobine-sonde *b* de section suffisante).

B_1 et *b* étant maintenues fixes, réglons, à l'aide du rhéostat, le courant d'excitation à une valeur I_1 ; puis ouvrons le circuit inducteur : le fluxmètre dévie ; la lecture fournit Φ_1.

Recommençons la mesure pour les valeurs I_2, I_3, ..., du courant inducteur, nous constatons que $\frac{\Phi_1}{I_1} = \frac{\Phi_2}{I_2} = ... = \text{Cte}$



La force magnétomotrice, proportionnelle au flux, est proportionnelle au courant inducteur I.

b. **Influence du nombre des spires inductrices.**

En substituant à B_1, comportant N_1 spires, des bobines de même dimension, mais ayant des nombres de spires différents : N_2, N_3, ...,

pour la même valeur du courant inducteur I, nous trouvons des flux Φ_1, Φ_2, Φ_3, ..., tels que $\frac{\Phi_1}{N_1} = \frac{\Phi_2}{N_2} = ...$

La force magnétomotrice, proportionnelle au flux, est proportionnelle au nombre N des spires de la bobine.

c. **Conclusion.**

La force magnétomotrice est donc proportionnelle au produit NI.

NI est le nombre des ***ampèretours*** de l'inducteur.

La relation $M = KNI$, où K dépend seulement des unités choisies, traduit ce résultat.

d. **Unités.**

L'unité de force magnétomotrice est l'ampèretour (1 At); avec cette unité $K = 1$.

$$M = NI \text{ ampèretours.}$$

Remarque.

Lorsqu'un circuit magnétique comprend du fer (ou un autre milieu magnétique), le flux Φ n'est proportionnel au courant inducteur que pour des intensités inférieures à une certaine limite (*Saturation*, p. 140), mais, par définition, la force magnétomotrice est toujours exprimée par $M = NI$.

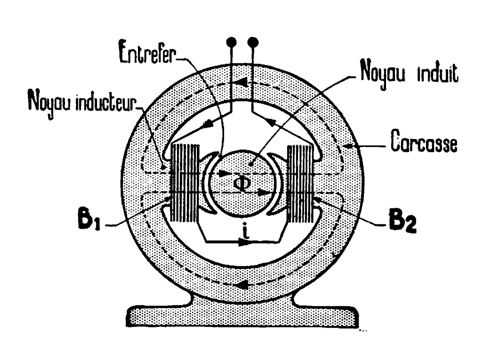
3. — ASSOCIATION EN SÉRIE

Exemples.

Circuit magnétique de la dynamo bipolaire.

L'enroulement inducteur comporte deux bobines B_1 et B_2 présentant (par raison de symétrie) le même nombre N_1 de spires.

Ces deux bobines sont associées en série ; elles sont parcourues par le même courant d'excitation et sont enroulées dans le même sens.



Le circuit magnétique comprend :

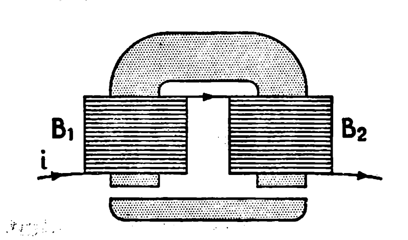
— les noyaux des inducteurs ;

— le noyau de l'induit séparé des précédents par les entrefers ;

— la carcasse, support et enveloppe de l'ensemble.

Ces deux bobines donnent des forces magnétomotrices M_1 et M_2 de même sens, qui s'ajoutent :

Force magnétomotrice résultante : $M = M_1 + M_2 = N_1I_1 + N_2I_2$ (analogie avec les forces électromotrices de générateurs en série).



Lorsque les deux bobines inductrices (en série) sont parcourues par le même courant I et présentent le même nombre N de spires,

$$M = 2\ NI$$

(2 NI est la force magnétomotrice totale du système inducteur).

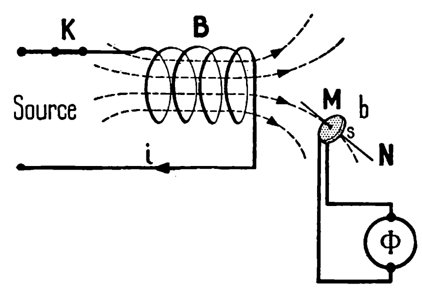
Il en est de même des électroaimants à deux bobines de N spires en série.

III. — INDUCTION MAGNÉTIQUE

I. — FLUX MAGNÉTIQUE A TRAVERS UNE SURFACE

Explorons le champ d'un inducteur avec un fluxmètre.

a. En un point M du champ de la bobine B, plaçons une bobine-sonde *b* du fluxmètre ; coupons le circuit inducteur, la déviation du fluxmètre permet de déterminer le flux φ qui traverse cette bobine *b* de surface *s*.



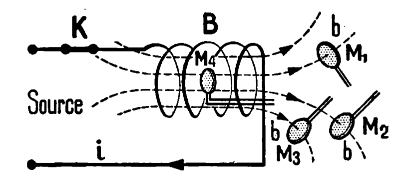
Laissant le centre de la bobine-sonde en M, effectuons plusieurs mesures pour des orientations différentes de cette bobine *b*, nous obtenons diverses valeurs de φ.

La valeur maximum φ_1 du flux qui traverse *b* est obtenue quand l'axe de *b* est dirigé suivant la ligne de flux passant en M.

Cette valeur φ_1 obtenue pour cette bobine *b* permet de caractériser l'état magnétique au voisinage du point M.

b. Portons successivement le centre de la bobine-sonde en divers points M_1, M_2, M_3,..., du champ magnétique de l'inducteur B ; mesurons chaque fois la valeur maximum du flux à travers la section *s* de *b*.

Ces valeurs $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \ldots$, sont, en général, différentes : le flux n'est pas uniformément réparti dans tout le champ magnétique de l'inducteur.



Par contre, pour divers points tels que M_4, à l'intérieur d'une bobine inductrice longue, les valeurs du flux maximum à travers b sont égales : *le flux y est uniformément distribué et le champ magnétique est dit uniforme.*

2. — DENSITÉ MOYENNE DU FLUX EN UN POINT

Avec le même fluxmètre, associé successivement à différentes bobines-sondes, de sections différentes $s_1, s_2, s_3, \ldots$ (assez faibles pour n'intéresser que le voisinage immédiat du point M), les mesures $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \ldots$, des flux maxima qui les traversent au point M sont telles que

$$\frac{\varphi_1}{s_1} = \frac{\varphi_2}{s_2} = \frac{\varphi_3}{s_3} = \ldots$$

L'expression $\frac{\varphi}{s}$ (analogue à $\frac{I}{s}$ densité de courant dans un conducteur) *est la densité moyenne de flux à travers la section s, placée en* M, *normalement à ce flux.*

3. — INDUCTION MAGNÉTIQUE $\mathcal{B}$ AU POINT M

a. Définition.

Soit une surface très petite ds placée en M, normale au flux, traversée par $d\varphi$; par définition :

Le quotient $\frac{d\varphi}{ds}$ *est la densité de flux au point M ; on l'appelle induction magnétique* $\mathcal{B}$ *au point* M.

L'expression précédente $\frac{\varphi}{s}$ définit l'induction magnétique moyenne $\mathcal{B}_{moy.}$, pour la région voisine du point M, limitée à s.

L'induction magnétique $\mathcal{B}$ *caractérise l'état magnétique du milieu au point* M.

b. Unité.

L'unité d'induction magnétique est le *weber par mètre carré* (1 Wb/m²).

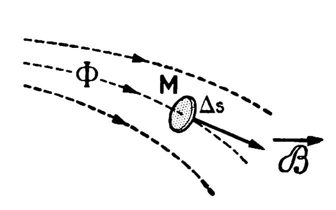
On emploie encore une unité rattachée au système C. G. S., *le gauss* (1 Gs) [1].

$$1 \text{ Wb/m}^2 = 10^4 \text{ Gs.}$$

(1) Gauss, physicien allemand (1777-1855).

c. Représentation.

La valeur de l'induction magnétique $\mathcal{B}$ en un point M est obtenue pour une position particulière de la bobine-sonde : l'axe dirigé suivant la ligne de flux.



La grandeur, induction magnétique, est représentée par un vecteur $\vec{\mathcal{B}}$ défini par ses éléments :

origine en M,

direction : tangente au flux,

sens : celui du flux (défini p. 121),

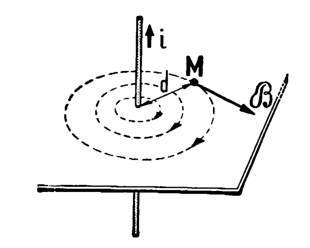
mesure : $\mathcal{B} = \frac{d\varphi}{ds}$, pour une section ds très petite (tendant vers 0).

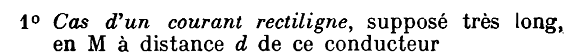
Remarque.

Le fluxmètre dont la bobine-sonde a une section notable s nous permet seulement de mesurer l'induction moyenne $\frac{\Phi}{s}$ au voisinage du point M.

Exemple [1].

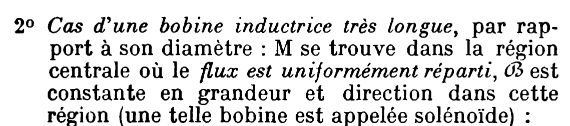
Valeur de l'induction magnétique $\mathcal{B}$, créée dans l'air, en un point M de son champ magnétique, par un inducteur, dans certains cas particuliers :





1° *Cas d'un courant rectiligne*, supposé très long, en M à distance d de ce conducteur

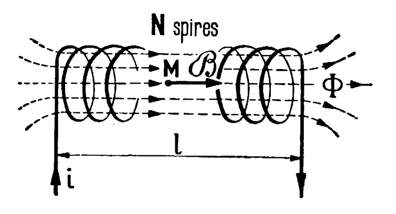
$$\mathcal{B} = \frac{2\ \mathrm{I}}{10^7 d}, \qquad \mathcal{B}\ \mathrm{Wb/m^2},\ \mathrm{I}\ \text{ampères},\ d\ \text{mètres}.$$



2° *Cas d'une bobine inductrice très longue*, par rapport à son diamètre : M se trouve dans la région centrale où le *flux est uniformément réparti*, $\mathcal{B}$ est constante en grandeur et direction dans cette région (une telle bobine est appelée solénoïde) :

$$\mathcal{B} = \frac{4\ \pi \mathrm{NI}}{10^7\ l}$$

I ampères, $\mathcal{B}$ Wb/m²,
l longueur de la bobine en mètres,
N nombre de spires.



Dans le cas d'une bobine inductrice courte, le flux n'est pas uniformément distribué à l'intérieur, l'induction $\mathcal{B}$ varie d'un point à un autre.

---

(1) Les valeurs respectives de $\mathcal{B}$, exprimées en gauss, dans les exemples envisagés sont :

1° pour un courant rectiligne : $\mathcal{B} = \frac{2\ \mathrm{I}}{10\ d}$, I en ampères, d en cm ;

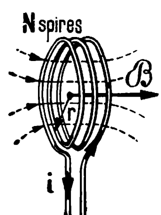
2° pour une bobine longue (région centrale) : $\mathcal{B} = \frac{4\ \pi \mathrm{NI}}{10\ l}$, I en ampères, l en **cm** ;

3° pour une bobine plate (en son centre) : $\mathcal{B} = \frac{2\ \pi \mathrm{NI}}{10\ r}$, I en ampères, r en cm.

3° *Dans le cas d'une bobine plate*, par exemple, la valeur de l'induction magnétique $\mathcal{B}$ en son centre seulement, est

$$\mathcal{B} = \frac{2\,\pi N I}{10^7\, r},$$

$\mathcal{B}$ Wb/m², I ampères, N nombre de spires, r mètres, rayon de la bobine.



EXERCICES

1 — On réalise un bobinage à spires jointives circulaires, en une seul couche, en enroulant sur un cylindre de 4 cm de diamètre 120 m de fil de cuivre verni de 1 mm² de section utile. Cet enroulement est connecté aux bornes d'une batterie d'accumulateurs de force électromotrice 4 V et de résistance négligeable. Calculer la force magnétomotrice de cet enroulement (résistivité du cuivre 1,6 μΩ. cm²/cm).

Réponse : environ 2 000 ampèretours.

2 — Calculer l'induction magnétique créée, dans l'air, par le courant, dans les trois cas suivants :

a. à 5 cm d'un fil rectiligne très long parcouru par un courant de 10 A ;

b. dans la région centrale d'une bobine longue, présentant 12 spires par centimètre de longueur, parcourue par un courant de 10 A ;

c. au centre d'une bobine plate de 10 cm de diamètre, présentant 40 spires, parcourue par un courant de 10 A.

Réponses : a. 4×10^{-5} *Wb/m²* ; b. 15×10^{-3} *Wb/m²* ; c. 5×10^{-3} *Wb/m²*.

3 — Une bobine longue, présentant 20 spires par centimètre de longueur, est fixée de manière que son axe soit perpendiculaire au plan méridien magnétique du lieu. Dans la région centrale de cette bobine, on place une petite aiguille aimantée mobile dans un plan horizontal.

L'établissement d'un courant de 14 mA dans la bobine provoque une déviation permanente de 60° de l'aiguille aimantée.

En considérant que l'induction magnétique dans l'air, résultant de l'action magnétique terrestre et de celle de la bobine, est caractérisée par le vecteur $\mathcal{B}$, somme géomémétrique des inductions magnétiques composantes, calculer la composante horizontale $\mathcal{B}_t$ de l'induction magnétique terrestre en ce lieu.

Réponse : $\mathcal{B}_t = 2 \times 10^{-5}$ *Wb/m²*.

4 — Une bobine sans noyau doit avoir une section rectangulaire de 40 mm × 30 mm et une longueur de 300 mm. On veut entretenir à l'intérieur un flux de 500 Mx. On dispose d'une tension de 12 V. Calculer la longueur et la section du fil nécessaire en admettant une densité de courant de 4 A/mm² (résistivité du cuivre 1,6 μΩ. cm²/cm). (C. A. P.)

On admettra que la formule d'une bobine très longue s'applique à ce cas.

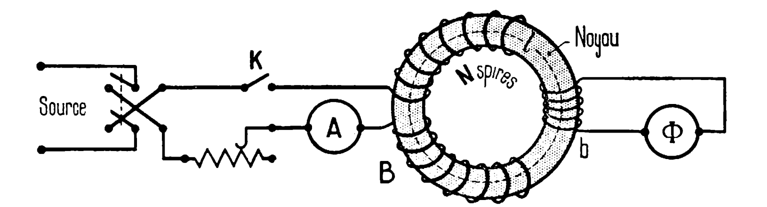
Réponses : 0,187 mm² ; environ 190 m de fil de 0,5 mm de diamètre.

22. — Induction magnétique dans le fer

I. — COURBE DE PREMIÈRE AIMANTATION

1. — DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Nous avons signalé (leçon 19) l'action magnétique d'un courant sur un morceau de fer ou d'acier.



Réalisons un circuit magnétique fermé dans un fer homogène, de forme géométrique simple, par exemple en forme de tore.

Ce noyau n'a subi au préalable aucune action magnétique. Sur toute la surface, enroulons régulièrement des spires conductrices isolées. De cette façon, au passage du courant inducteur dans l'enroulement, il n'y a pas apparition de pôles à la surface du noyau, le flux ne sort pas du fer ; aucune action magnétique extérieure sensible ne peut être décelée (par de la limaille de fer ou une aiguille aimantée par exemple).

Le circuit inducteur comprend : une source, un inverseur de courant, un interrupteur, un rhéostat de réglage, un ampèremètre.

Quelques spires, indépendantes des précédentes, enroulées sur le tore, constituent l'induit *b* de N spires relié au fluxmètre.

2. — MESURES

Donnons au rhéostat sa valeur maximum et *fermons le circuit inducteur.*

L'ampèremètre indique i_1, le fluxmètre donne $N\varphi_1$, φ_1 est le flux Φ_1 qui passe dans le fer ; amenons le courant croissant à i_2, le fluxmètre indique $N\varphi_2$, φ_2 est l'augmentation de flux au cours du passage de i_1 à i_2.

Le flux qui traverse le noyau est alors $\Phi_2 = \varphi_1 + \varphi_2$.

De proche en proche, nous aurons, pour des valeurs croissantes du courant inducteur, les diverses mesures du flux Φ qui traverse le fer.

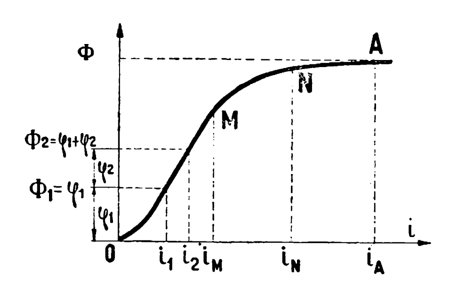
Ces résultats portés sur un graphique donnent une courbe.

3. — FORME DE LA COURBE

Cette courbe présente :

a. *une partie sensiblement rectiligne* jusqu'en M ;

Dans cet intervalle, le flux est sensiblement proportionnel au courant inducteur i ; l'effet varie comme sa cause, *les propriétés magnétiques du noyau sont pratiquement constantes* ;



b. *une partie coudée* MN correspondant à un intervalle dans lequel le flux n'est plus proportionnel à sa cause (le courant inducteur) ; pour les valeurs correspondantes du courant, *les propriétés magnétiques du noyau varient* ;

c. *une partie* NA *formant sensiblement un palier*, intervalle dans lequel le flux Φ n'augmente plus que très lentement avec le courant inducteur ; pour ces valeurs du courant, il y a *saturation magnétique du noyau.*

Ce résultat est en concordance avec l'hypothèse de l'aimantation considérée comme un phénomène moléculaire (p. 111).

La valeur Φ du flux maximum à la saturation détermine la valeur maximum de l'induction magnétique $\mathcal{B}$ que l'on peut pratiquement obtenir dans le métal considéré $\mathcal{B}_{max} = \frac{\Phi_{max}}{s}$.

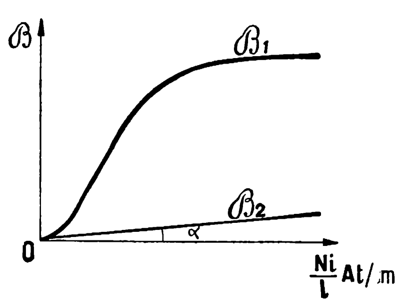
4. — AUTRE EXPRESSION DES RÉSULTATS

On peut représenter l'induction magnétique $\mathcal{B} = \frac{\Phi}{s}$ en fonction de $\frac{NI}{l}$, force magnétomotrice moyenne par unité de longueur du circuit magnétique ; *le résultat est indépendant de la longueur l et de la section s du circuit magnétique : il est caractéristique de la nature du matériau utilisé.*

La courbe obtenue est la courbe de première aimantation ($\mathcal{B}_1$). Cette courbe a même aspect que la précédente ; le changement des grandeurs de référence apporte un simple changement d'échelles sur les axes de coordonnées :

en abscisses $\frac{Ni}{l}$ au lieu de i ;

en ordonnées $\mathcal{B}$ au lieu de Φ.

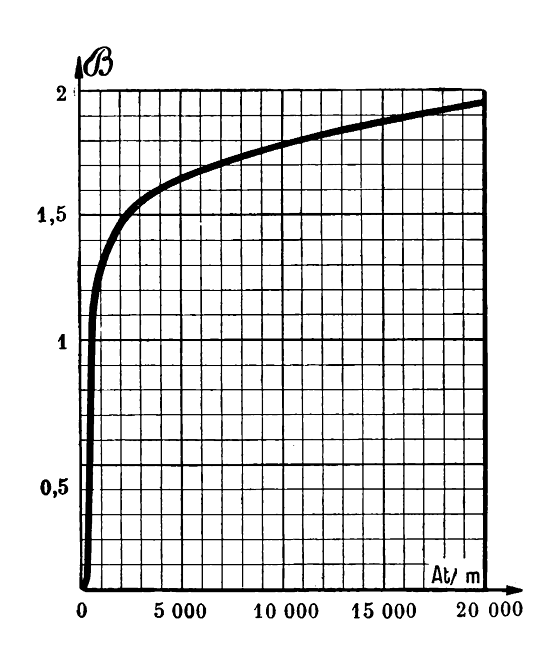


Des tables donnent, pour chaque matériau magnétique utilisé, le nombre d'ampèretours par mètre (At/m) *nécessaires pour obtenir l'induction magnétique* $\mathcal{B}$ *exprimée en webers par mètre carré.*

Exemple.

Valeurs relevées pour un noyau en tôle ordinaire (acier doux à 0,8 % de silicium, densité 7,7).

$\frac{Ni}{l}$ en At/m	$\mathcal{B}$ en Wb/m².
0	
500	1
1 000	1,28
2 000	1,47
3 000	1,57
4 000	1,625
5 000	1,66
6 000	1,695
7 000	1,72
8 000	1,75
9 000	1,775
10 000	1,8
20 000	1,945
30 000	2,02
40 000	2,08
50 000	2,125
60 000	2,15
70 000	2,175



Ces résultats se traduisent par la courbe de l'induction magnétique $\mathcal{B}$, en fonction des At/m, pour le matériau considéré.

On obtient des courbes de même allure pour des noyaux de fer, de fonte et d'acier.

5. — MATÉRIAUX NON MAGNÉTIQUES

Pour des milieux non magnétiques tels que le bois, le cuivre, l'air et même le vide, *la courbe obtenue est une droite* (courbe $\mathcal{B}_2$) (le flux Φ et l'induction magnétique $\mathcal{B} = \frac{\Phi}{s}$ sont proportionnels au nombre des ampèretours pour un inducteur de forme donnée, leçon 22).

On désigne par tg α la pente de cette droite :
Cette pente est la même pour tous ces matériaux, elle est égale à $\frac{4\pi}{10^7}$.

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\mathcal{B}}{\frac{NI}{l}} = \frac{4\pi}{10^7}$$

$\mathcal{B}$ en Webers/m².
I en ampères.
l en mètres.

La relation $\mathcal{B} = \frac{4\pi}{10^7}\frac{NI}{l}$ donnée pour l'intérieur d'une bobine longue est applicable à l'enroulement torique considéré ($\mathcal{B}$ est proportionnelle au nombre des ampèretours par unité de longueur).

6. — PERMÉABILITÉ MAGNÉTIQUE RELATIVE

Pour une même valeur des ampèretours par unité de longueur moyenne du circuit magnétique, l'induction magnétique $\mathcal{B}_1$ obtenue dans un matériau magnétique est très supérieure à celle $\mathcal{B}_2$ obtenue dans un matériau non magnétique, par exemple dans l'air.

Ce résultat suppose un circuit magnétique homogène et non saturé.

Les matériaux magnétiques sont dits plus perméables que l'air au passage du flux magnétique.

Le rapport $\mu = \frac{\mathcal{B}_1}{\mathcal{B}_2}$ mesure la perméabilité magnétique relative du matériau par rapport à l'air.

Exemple.

Pour le métal correspondant aux valeurs numériques données :

a. pour $\frac{NI}{l} = 500$ At/m $\quad \mathcal{B}_1 = 1$ Wb/m²,

... dans l'air $\quad \mathcal{B}_2 = \frac{1,25}{10^6} \times 500 = \frac{625}{10^6}$ Wb/m², $\mu = \frac{1 \times 10^6}{625} = 1\,600$.

b. pour $\frac{NI}{l} = 1\,000$ At/m $\quad \mathcal{B}_1 = 1,28$ Wb/m².

... dans l'air $\quad \mathcal{B}_2 = \frac{1,25}{10^6} \times 1\,000 = \frac{1,25}{1\,000}$ Wb/m², $\mu = \frac{1,28 \times 1\,000}{1,25} = 1\,024$.

c. pour $\frac{NI}{l} = 10\,000$ At/m $\mathcal{B}_1 = 1{,}8$ Wb/m²

... dans l'air $\mathcal{B}_2 = \frac{1{,}25}{10^6} \times 10\,000 = 0{,}0125$ Wb/m², $\mu = \frac{1{,}8}{0{,}0125} = 144$.

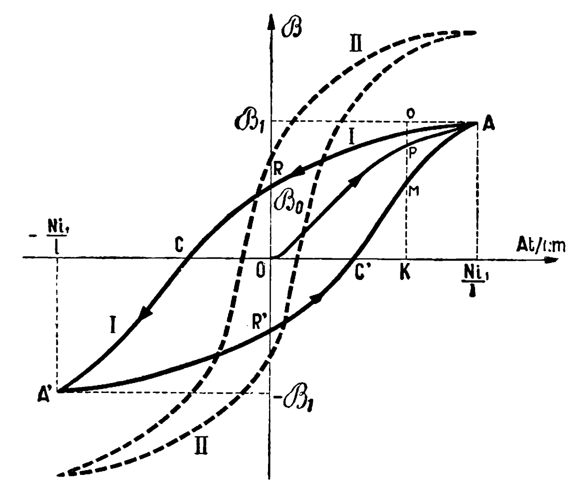
La perméabilité relative par rapport à l'air du métal magnétique décroît très rapidement au voisinage de la saturation.

7. — CYCLE D'HYSTÉRÉSIS

a. Dans l'expérience précédente, après avoir atteint une valeur i_1 du courant inducteur correspondant au point A, revenons à $i = 0$ par valeurs décroissantes.

Notons les diminutions successives du flux (lectures au fluxmètre).

Calculons les valeurs de l'induction magnétique $\mathcal{B} = \frac{\Phi}{s}$, pour les diverses mesures. Portons $\mathcal{B}$ sur un graphique en fonction des valeurs de $\frac{Ni}{l}$ (i lu à l'ampèremètre à chaque mesure).



La courbe obtenue AR ne coïncide pas avec AO (courbe de première aimantation).

Pour $i = 0$, $\mathcal{B}_0 = \overline{OR}$ n'est pas nulle, *c'est l'induction rémanente du noyau. Le métal reste aimanté après la disparition du courant inducteur.*

b. Inversons le sens du courant et faisons varier i par valeurs successives de zéro à $-\,i_1$; nous traçons par points une branche de courbe RCA'.

L'induction magnétique $\mathcal{B}$ décroît et s'annule pour une valeur OC (valeur coercitive) du nombre des At/m *correspondant à la désaimantation du noyau.*

Puis l'induction $\mathcal{B}$ change de sens et atteint la valeur $-\mathcal{B}_1$, le point figuratif A' étant pratiquement symétrique du point A par rapport à O.

c. Les mesures de $\mathcal{B}$, pour les valeurs de i variant de $-\,i_1$ à $+\,i_1$, permettent de tracer une branche de courbe A'R'C'A sensiblement symétrique de la précédente.

L'ensemble constitue un cycle appelé cycle d'hystérésis.

Nous rencontrons en R′ une nouvelle valeur $-\mathcal{B}_0$, induction rémanente, et en C′ une nouvelle valeur coercitive $\overline{OC'}$ des ampèretours par unité de longueur, qui annulent l'aimantation du noyau.

Remarque.

Pour un matériau magnétique donné, plusieurs cycles d'hystérésis successivement décrits dans les mêmes limites du courant d'excitation sont d'abord distincts, puis se confondent, le cycle est stabilisé.

On remarquera sur le cycle que, pour une valeur donnée $\overline{OK}$ des At/m, on peut obtenir diverses valeurs de l'induction magnétique $\mathcal{B}$, définies par les points figuratifs M, P, Q sur les diverses branches de courbe.

Les valeurs de $\mathcal{B}$ dépendent donc des conditions antérieures *auxquelles le noyau a été soumis.*

8. — APPLICATION

Le cycle d'hystérésis, par sa forme et ses points remarquables A, R, C, caractérise les propriétés magnétiques du matériau considéré.

Les fers, fontes, aciers, alliages ferreux présentent de l'aimantation rémanente ; dans le fer doux, elle est instable et disparaît facilement.

Cette étude permet le choix des alliages appropriés à des emplois déterminés :

a. *Matériaux à saturation élevée, grande perméabilité* pour obtenir de grandes valeurs de l'induction magnétique $\mathcal{B}$ (alliages ferromagnétiques à base de nickel, permalloys).

b. *Matériaux présentant une valeur importante de l'induction rémanente, et surtout une valeur très grande des At/m nécessaires à la désaimantation* (valeur coercitive), pour la confection d'aimants permanents (aciers et alliages au cobalt, au chrome, au tungstène, au manganèse, au nickel, à l'aluminium).

9. — PERTE D'ÉNERGIE PAR HYSTÉRÉSIS

Si nous faisons subir assez rapidement, à un échantillon de métal magnétique, des cycles d'hystérésis successifs, il s'échauffe.

L'aimantation a un effet directeur sur l'orientation des molécules, ces variations entraînent un travail mécanique à l'intérieur du métal : *ce travail produit un dégagement de chaleur.*

Dans les machines électriques, de nombreuses pièces de fer (fonte ou acier) se trouvent continuellement dans des champs à induction magnétique variable.

Ces pièces sont soumises à des cycles d'hystérésis et s'échauffent au détriment du rendement de la machine.

L'étude du phénomène montre que l'énergie absorbée par cycle est proportionnelle à l'aire de ce cycle : la connaissance des propriétés magnétiques des matériaux employés est donc d'un grand intérêt pour le constructeur.

EXERCICES

1 — Un aimant droit, de longueur $l = 20$ cm, a une section circulaire de 2 cm de diamètre. Calculer :

a. l'induction magnétique dans la section médiane de l'aimant, sachant qu'une bobine plate, comportant 10 spires, reliée à un fluxmètre, provoque une déviation de ce dernier de 125×10^{-6} Wb lorsqu'on retire l'aimant loin de la bobine (l'aimant était engagé dans la bobine jusqu'à cette section médiane) ;

b. le courant à admettre dans une bobine sans noyau de même longueur que l'aimant et de diamètre intérieur 2 cm, comportant 5 couches de 80 spires chacune, pour obtenir le même flux dans la région médiane. (Bobine très longue.)

Réponses : 0,04 Wb/m^2; 16 A.

2 — Pour une variété d'acier doux, des essais ont donné : At/cm : 1, 2, 3, 4.
Valeurs correspondantes de $\mathcal{B}$ en gauss : 2 300, 6 000, 8 400, 10 000.

a. Tracer la courbe d'aimantation.

b. Déterminer le nombre d'ampèretours nécessaires pour obtenir un flux de 0,002 Wb dans le circuit magnétique suivant : cadre rectangulaire de longueur moyenne 60 cm, de section 30 cm^2, réalisé avec l'acier doux ayant fait l'objet des mesures données.

Réponse : 136 At environ.

3 — On admet que le fer, pour une induction magnétique inférieure à 10 000 Gs, a une perméabilité magnétique relative par rapport à l'air sensiblement constante et égale à 1 600.

Calculer, dans ces conditions, la force magnétomotrice de l'enroulement nécessaire pour entretenir dans un noyau torique en fer, de diamètre moyen 20 cm, de section circulaire de diamètre 2 cm, un flux de 25×10^{-5} Wb.

Réponse : 250 At.

4 — Un tore de fer de diamètre moyen 200 mm, diamètre de section 50 mm, porte deux enroulements distincts ; l'un, de 400 spires uniformément réparties, est traversé par un courant de 1 A ; l'autre, de 60 spires, est relié à un fluxmètre qui indique une variation du flux total, à travers ce bobinage, de 0,24 Wb quand on inverse le courant dans le premier enroulement. Calculer la perméabilité relative du noyau par rapport à l'air, pour l'induction magnétique réalisée.

Réponse : 1 280.



23. — Circuits magnétiques

I. — LOI D'HOPKINSON

1. — FUITES DE FLUX

Nous avons supposé, dans l'étude précédente :

a. que le noyau constituait un circuit magnétique homogène fermé ;

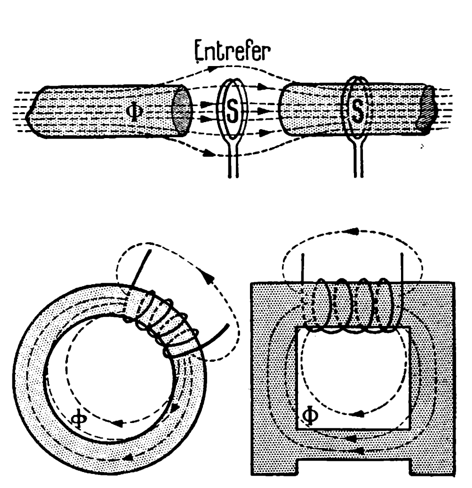
b. que l'enroulement inducteur était continu tout le long de ce noyau.

Dans ces conditions, le flux accomplit tout son parcours dans le noyau. Par contre :

— un entrefer, surtout s'il est long, par rapport à sa section, provoque un épanouissement du flux ;

— si l'enroulement n'occupe qu'une partie de la longueur, il n'en est plus de même pour des valeurs de l'induction magnétique $\mathcal{B}$ voisines de la saturation : une partie du flux s'échappe ;

— sur un noyau à angles vifs, la fuite de flux est plus importante pour les mêmes valeurs de $\mathcal{B}$.



2. — INFLUENCE DU CIRCUIT MAGNÉTIQUE

Le flux magnétique dans un circuit est provoqué par la force magnétomotrice, mais il dépend aussi du circuit lui-même.

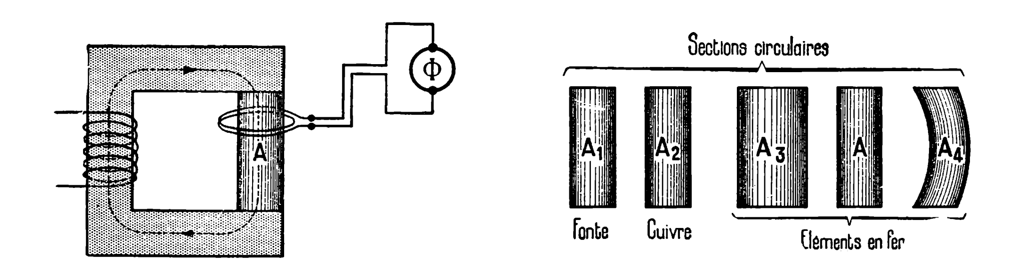
Par exemple, pour une même force magnétomotrice, l'induction magnétique $\mathcal{B}_1$ dans un noyau de fer est très supérieure à l'induction $\mathcal{B}_2$ dans l'air.

Expérience.

Utilisons un circuit magnétique comprenant un noyau de fer démontable dans lequel l'élément A peut être remplacé par des éléments différents :

A_1 en fonte et A_2 en cuivre de mêmes dimensions que A ;

A_3 et A_4 en fer de dimensions différentes de celles de A.



Pour une même force magnétomotrice M, mesurons successivement le flux à travers chaque élément A, A_1, A_2, A_3, A_4.

Nous obtenons des valeurs Φ, Φ_1, Φ_2, Φ_3, Φ_4 telles que :

a. $\Phi > \Phi_1 > \Phi_2$; ceci montre *l'influence de la nature de l'élément de circuit magnétique, les dimensions étant données :*

b. $\Phi_3 > \Phi > \Phi_4$; ceci montre *l'influence des dimensions des éléments de circuit magnétique de même nature.*

3. — RÉLUCTANCE

Le quotient de la force magnétomotrice par le flux qui traverse le circuit magnétique peut servir à caractériser ce circuit :

par définition, ce quotient $\mathcal{R} = \frac{M}{\Phi}$ ***est la réluctance du circuit magnétique.***

Cette relation est analogue à l'expression de la loi d'Ohm $R = \frac{E}{I}$ pour le circuit électrique, dans lequel la force électromotrice E entretient le courant I à travers la résistance R.

Remarque.

L'induction magnétique créée dans l'air, à l'intérieur de l'enroulement torique considéré dans la leçon précédente, s'exprime par $\mathcal{B}_2 = \frac{4\,\pi NI}{10^7\, l}$ (relation applicable aux bobines longues, p. 142).

Le même enroulement, pour un même courant d'excitation, crée dans **un noyau magnétique fermé l'induction** $\mathcal{B}_1 = \mu\mathcal{B}_2$ (μ, perméabilité magnétique relative du noyau par rapport à l'air).

Par suite, le flux Φ_1 qui traverse ce noyau est $\Phi_1 = \mathcal{B}_1 s$,

d'où $$\Phi_1 = \frac{4\,\pi}{10^7}\frac{NI\,\mu s}{l} \quad ou \quad \Phi_1 = \frac{4\,\pi NI}{10^7\left(\frac{l}{\mu s}\right)}$$

L'identification avec la relation $\Phi = \frac{M}{\mathcal{R}}$ ci-dessus fournit l'expression de **la réluctance du noyau fermé :** $\mathcal{R} = \frac{10^7}{4\,\pi}\frac{l}{\mu s}$ (où l est évaluée en m, et s en m²).

La réluctance d'un circuit magnétique homogène est proportionnelle à sa longueur, inversement proportionnelle à sa section et dépend de la nature du matériau, caractérisé par sa perméabilité relative μ.

Il y a **analogie de forme** entre l'expression d'une **réluctance** et l'expression d'une **résistance** électrique $R = \rho\frac{l}{s}$; en désignant par γ la **conductivité électrique** (inverse de la résistivité), *la résistance s'écrit :* $R = \frac{l}{\gamma s}$.

De même que la **conductivité électrique** d'un matériau est variable (avec la température par exemple), la **perméabilité magnétique** relative μ d'un matériau magnétique est variable : elle dépend des conditions d'emploi. En particulier, on ne peut la considérer constante que pour les valeurs de l'induction magnétique $\mathcal{B}$ correspondant à la partie rectiligne de la courbe d'aimantation.

4. — CIRCUIT MAGNÉTIQUE CONSTITUÉ D'ÉLÉMENTS EN SÉRIE

Supposons les fuites de flux négligeables ; le même flux traverse tous les éléments du circuit magnétique.

L'identité de forme de la loi d'Ohm $E = RI$ et de la loi du circuit magnétique $M = \mathcal{R}\Phi$ entraîne des conclusions identiques.

a. La *réluctance* $\mathcal{R}$ de l'ensemble des éléments en série du circuit magnétique est donnée par l'expression $\mathcal{R} = \mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2 + \dots$

$\mathcal{R}_1$, $\mathcal{R}_2$ ... réluctances des divers éléments.

Pour un même nombre d'ampèretours par unité de longueur, l'induction magnétique $\mathcal{B}_2$ dans des matériaux non magnétiques est plus faible que l'induction magnétique $\mathcal{B}_1$ créée dans des matériaux magnétiques.

Les matériaux non magnétiques ont une plus grande réluctance que les substances magnétiques.

Un entrefer peut être considéré comme une grande réluctance mise en série dans le circuit magnétique. Ceci justifie les efforts de réduction des entrefers dans la construction des circuits magnétiques pour lesquels on veut obtenir un flux Φ et, par suite, une induction magnétique $\mathcal{B}$ aussi grands que possible, avec une force magnétomotrice limitée.

b. *Pour un circuit magnétique donné, les forces magnétomotrices (donnant des flux de même sens) s'ajoutent de la même façon que les forces électromotrices en série dans un circuit électrique.*

Nous écrirons $M = M_1 + M_2 + ...$

M est la force magnétomotrice résultante ; M_1, M_2 sont les forces magnétomotrices des enroulements successifs placés sur le même circuit magnétique.

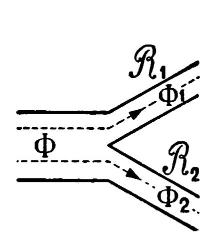
Des forces magnétomotrices de sens contraires se retranchent comme des forces électromotrices en opposition.

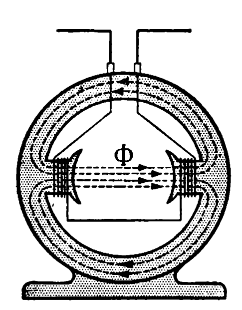
c. Si le circuit magnétique comporte plusieurs réluctances $\mathcal{R}_1$, $\mathcal{R}_2$, ..., et plusieurs forces magnétomotrices en série M_1, M_2, ...,

nous écrirons $$M_1 + M_2 + ... = \Phi(\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2 + ...),$$

c'est-à-dire $$\boxed{\Sigma \mathbf{M} = \Phi \Sigma \mathcal{R}}$$

Cette expression traduit la loi d'Hopkinson, analogue à la loi d'Ohm appliquée à un circuit électrique fermé $\Sigma E = I\, \Sigma R$.





Remarque

Dans les circuits magnétiques où le flux se partage en plusieurs parties, par exemple dans la carcasse d'une dynamo, les réluctances des diverses parties du circuit magnétique sont en dérivation, la réluctance équivalente à l'ensemble peut se déterminer comme la résistance équivalente à des résistances en dérivation :

$$\frac{1}{\mathcal{R}} = \frac{1}{\mathcal{R}_1} + \frac{1}{\mathcal{R}_2} + ...$$

II. — MÉTHODE INDUSTRIELLE DE CALCUL

Détermination des ampèretours nécessaires pour entretenir un flux Φ dans un circuit magnétique donné.

La force magnétomotrice à appliquer au circuit magnétique est la somme des forces magnétomotrices qu'il faudrait appliquer sur les divers éléments en série du circuit magnétique pour que chaque élément du circuit soit parcouru par le flux Φ.

1. — CIRCUIT MAGNÉTIQUE SANS ENTREFER

Pour un élément de section s donnée, l'induction magnétique est $\mathcal{B} = \frac{\Phi}{s}$.

Des tables ou des courbes (voir p. 141) donnent $\frac{NI}{l}$, nombre d'ampère-tours par unité de longueur, correspondant à l'induction magnétique $\mathcal{B}$ dans ce matériau.

La connaissance de la longueur moyenne l des lignes du flux dans cet élément permet de calculer la force magnétomotrice NI nécessaire pour cet élément.

On déterminera ΣNI, somme des forces magnétomotrices relatives aux divers éléments en série du circuit magnétique.

2. — CIRCUIT MAGNÉTIQUE AVEC ENTREFER

Dans le cas où le circuit magnétique présente un entrefer, de longueur e, faible devant celle du circuit magnétique, on calcule la force magnétomotrice nécessaire pour entretenir le flux Φ désiré dans cet entrefer.

L'induction magnétique est donnée par $\mathcal{B} = \frac{\Phi}{s}$ (s section de l'entrefer sensiblement égale à celle du noyau au niveau de cet entrefer).

— Pour un milieu non magnétique :

$$\mathcal{B} = \frac{1,25}{10^6}\frac{NI}{l} \quad \text{ou} \quad NI = 0,8 \times 10^6\, \mathcal{B} l \qquad \begin{array}{l}\mathcal{B}\ \text{Wb/m}^2\\ \text{I ampères,}\\ l\ \text{mètres.}\end{array}$$

ici $l = e$, d'où $(NI)_1 = 0,8 \times 10^6\, \mathcal{B} e$, force magnétomotrice nécessaire pour l'entrefer.

— On évalue ensuite, comme dans le paragraphe précédent, la force magnétomotrice nécessaire pour les éléments du noyau magnétique.

La force magnétomotrice totale à appliquer sur le noyau du circuit magnétique avec entrefer est

$$M = \Sigma NI = (NI)_1 + (NI)_2$$

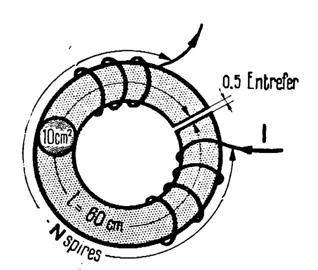
Remarques.

1 — Pour tenir compte des fuites de flux, des joints, des contacts défectueux entre les divers éléments, on pourra, s'il y a lieu, multiplier le nombre ΣNI par un coefficient approprié, déterminé par la pratique (ce coefficient est souvent voisin de 1,2).

2 — Dans le cas où la longueur de l'entrefer devient importante devant la longueur moyenne du circuit magnétique, la réluctance de cet entrefer devient prépondérante ; d'autre part, le flux s'épanouit dans l'air et ne se prête pas à des mesures précises de longueur et de section.

Application.

On dispose d'un noyau torique en acier doux au silicium (0,8 % de Si), de section **10 cm²** ; il présente un entrefer de 0,5 cm, la longueur moyenne du noyau est 60 cm.



On veut entretenir dans ce tore un flux $\Phi = 0{,}00125$ Wb, déterminer la force magnétomotrice nécessaire.

On utilisera la courbe d'aimantation donnée au chapitre précédent.

Solution

Nous pouvons admettre que le flux conserve une section constante $s = 10$ cm² dans cet entrefer de peu de longueur (par rapport au diamètre du noyau).

Dans ce cas, l'induction magnétique, $\mathcal{B} = \frac{\Phi}{s}$ garde la même valeur tout le long du circuit magnétique :

$$\mathcal{B} = \frac{0{,}00125}{0{,}001} = 1{,}25 \text{ Wb/m}^2.$$

Pour l'entrefer, il faut :

$$M_1 = (NI)_1 = 0{,}8 \times 10^6\, \mathcal{B}l = 0{,}8 \times 10^6 \times 1{,}25 \times 0{,}005 = 5\,000 \text{ At.}$$

Par interpolation sur la courbe d'aimantation du métal constituant le noyau, pour $\mathcal{B} = 1{,}25$ Wb/m² il faut 900 At/m, c'est-à-dire, pour **la longueur du noyau**, $l = 0{,}6$ m,

$$M_2 = (NI)_2 = 900 \times 0{,}6 = 540 \text{ At.}$$

Il faudra donc disposer sur le noyau un enroulement inducteur de force magnétomotrice

$$M = (NI)_1 + (NI)_2 = \mathbf{5\,540 \text{ At}}.$$

EXERCICES

1 — Un circuit magnétique comprend : un noyau en demi-cercle de rayon moyen 12 cm en fer rond dont la section a 2 cm de diamètre, une armature droite en fer carré de 2 cm de côté, un carton de 0,5 mm d'épaisseur appliqué sur les pôles du noyau qui empêche le contact noyau-armature. On veut obtenir une induction de 8 000 Gs dans le noyau, la perméabilité relative du fer par rapport à l'air est supposée constante et égale à 1 600 jusqu'à une induction magnétique de 10 000 Gs.

Calculer, dans ces conditions, la réluctance de ce circuit magnétique, la force magnétomotrice de l'enroulement nécessaire et le courant à utiliser si l'enroulement comporte 400 spires.

Réponses : $\mathcal{R} = 3{,}45.\ 10^6$ *M. K. S.;* $M = 870$ *At;* $I = 2{,}18$ *A.*

2 — On veut entretenir dans un circuit magnétique un flux de 0,006 Wb. Ce circuit magnétique comprend un noyau en acier doux au silicium, de section rectangulaire 8 cm × 5 cm, de longueur moyenne 80 cm, et un entrefer de 0,8 cm. En utilisant la courbe d'aimantation de l'acier doux à 0,8 % de Si donnée dans le livre, déterminer le nombre d'ampèretours à disposer sur le noyau (on négligera la dispersion du flux dans l'entrefer).

Réponse : 11 440 At.

3 — On réalise un circuit magnétique à l'aide de trois noyaux cylindriques, de diamètre 3 cm, de hauteur 20 cm, dont les axes parallèles et dans un même plan sont espacés de 6 cm. Ces trois noyaux sont réunis à leurs extrémités par deux armatures de fer droites, de section carrée de 3 cm de côté.

Le noyau central porte un enroulement de 200 spires, parcouru par un courant de 0,5 A. Le flux émis par cette force magnétomotrice est ainsi réparti dans les deux noyaux latéraux.

En supposant la perméabilité du fer par rapport à l'air égale à 1 600, calculer, dans ces conditions, l'induction magnétique dans chacun des noyaux. (On ne tiendra pas compte des joints.)

Réponses : environ 0,55 Wb/m^2 et 0,27 Wb/m^2.

4 — On dispose d'un noyau cylindrique en acier doux de 20 cm de longueur et de 2 cm de diamètre, dans lequel on veut obtenir une induction magnétique de 1 Wb/m^2 dans la région centrale.

Les essais magnétiques de ce métal indiquent 500 At/m pour $\mathcal{B} = 1$ Wb/m^2.

Dans un tel circuit magnétique fermé par l'air, on admet que la réluctance de l'air est donnée par la formule empirique $\mathcal{R}_{air} = \frac{K}{l}$, l, en mètres, étant la longueur du barreau.

La valeur de K dépend du rapport $\frac{l}{d}$ de la longueur au diamètre du barreau : en unités M. K. S. A.

$K = 17,5 \times 10^5$ pour $\frac{l}{d} = 10$.

$K = 25 \times 10^5$ pour $\frac{l}{d} = 20$.

$K = 32 \times 10^5$ pour $\frac{l}{d} = 50$.

Déterminer le nombre d'ampèretours nécessaires.

En utilisant pour le bobinage du fil de cuivre de 1 mm de diamètre, et en admettant un courant de 3 A, quelle est la tension d'alimentation nécessaire (résistivité du fil de cuivre 1,6 $\mu\Omega$. cm).

Compte tenu de l'isolement et des différentes couches de fil on prendra un diamètre moyen de spires de 3 cm.

Réponses : environ 2 850 At; environ 5,5 V.

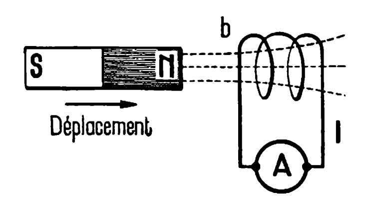


24. — Actions électromagnétiques

I. — ÉNERGIE MISE EN JEU DANS L'INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

1. — INDUCTION PAR DÉPLACEMENT

Le déplacement d'un aimant inducteur en face d'un circuit induit fermé provoque dans celui-ci le passage d'un courant induit. Ce courant dissipe de l'énergie thermique dans les conducteurs de l'induit ; d'où provient cette énergie ?



Après refroidissement du circuit, l'aimant et le circuit se retrouvent dans leur état initial : *cette énergie a donc été fournie par l'opérateur.*

Le déplacement de l'aimant inducteur a exigé un travail mécanique :

Le courant induit a opposé une force d'origine électromagnétique au déplacement de l'inducteur.

2. — INDUCTION SANS DÉPLACEMENT RELATIF

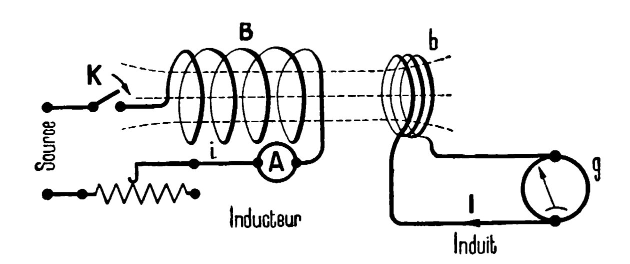
La variation du courant dans l'inducteur fixe provoque dans l'induit l'apparition du courant induit.

C'est alors la source d'alimentation de l'inducteur qui a fourni l'énergie apparue dans l'induit.

Lorsque nous fermons l'interrupteur K, le courant inducteur ne s'établit pas instantanément dans B ; il s'établit moins rapidement, dans ces conditions, qu'il le ferait si l'induit *b* était hors du champ magnétique de l'inducteur B.

Le courant temporaire, dans l'induit *b*, a produit dans l'inducteur B une force électromotrice d'induction qui s'oppose à la force électromotrice de la source.

L'inducteur B est alors un récepteur (présentant une force contre-électromotrice) qui consomme plus d'énergie qu'il n'en dissipe par effet thermique: il a transmis, par induction, à l'induit *b*, une partie de l'énergie reçue de la source.



Remarque.

Si le circuit induit est ouvert, il est le siège d'une force électromotrice d'induction, mais il ne consomme pas d'énergie (courant nul) :

L'induit en circuit ouvert est sans influence sur l'inducteur.

3. — LOI DE LENZ [1]

Le résultat précédent est général, il est conforme au principe de la conservation de l'énergie :

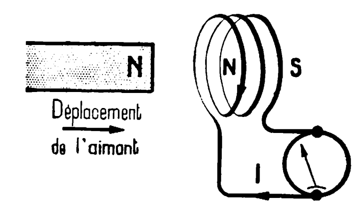
Le courant induit s'oppose à la cause qui le produit.

4. — APPLICATION

Cette loi permet de déterminer le sens du courant induit et, par suite, le sens de la force électromotrice induite en fonction de la variation de flux.

Exemples.

a. Approchons d'une face d'une bobine, présentant un circuit fermé, un pôle nord N d'aimant ; cette face devient, sous l'effet du courant induit, une face nord qui tend à repousser le pôle nord inducteur N que l'on approche.



Si, au contraire, nous éloignons le pôle N, de cette face elle devient une face sud qui tend à attirer ce pôle inducteur N que l'on éloigne.

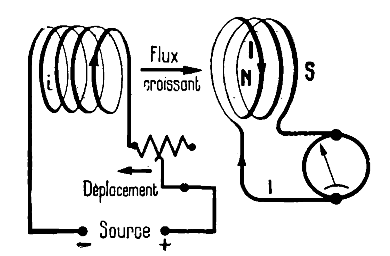
La polarité des faces de la bobine induite permet de déterminer le sens du courant qui la parcourt (page **117**).

---

(1) **Lenz, physicien russe (1804-1865).**

b. Augmentons le flux entrant dans une bobine, en augmentant le courant inducteur ; la face par laquelle entre ce flux devient, sous l'effet du courant induit, une face nord, émettant un flux inducteur croissant.

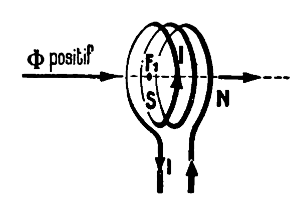
Le flux émis par le courant induit tend à réduire la variation de flux embrassé par l'induit.



5. — GÉNÉRALISATION

a. Convention.

Prenons un sens positif arbitraire sur un enroulement de bobine. Nous appellerons courant positif un courant ayant ce sens, et force électromotrice positive celle qui crée un tel courant.



Pour une face de référence F_1 choisie sur une bobine, le flux entrant dans la bobine par cette face est positif (leçon 20). On prendra toujours comme sens positif, sur l'enroulement, celui du courant qui y créerait lui-même un tel flux :

ainsi, le courant I dans un bobinage et le flux Φ qu'il crée à travers ce bobinage sont positifs (ou négatifs) en même temps.

b. Application.

Si un induit est traversé par un flux positif qui augmente pendant l'intervalle de temps dt (infiniment petit), la variation de flux $d\Phi$ qui traverse cet induit est positive. Le courant induit (circuit induit fermé) crée un flux $d\Phi'$ opposé à cette variation $d\,\Phi$.

Par suite, $d\Phi'$ est de sens négatif, il en est de même du courant induit I qui le crée, et de la force électromotrice d'induction E :

La force électromotrice d'induction est de signe contraire à celui de la variation de flux à travers l'induit.

La loi de l'induction électromagnétique, que nous avions exprimée par $|\,E\,| = \frac{|\,d\Phi\,|}{dt}$, ***se traduit dans tous les cas par la relation :***

$$\mathbf{E = -\frac{d\Phi}{dt}}$$

relation dans laquelle E et $d\Phi$ sont des grandeurs algébriques.

II. — TRAVAIL DES FORCES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

1. — RÉVERSIBILITÉ DU PHÉNOMÈNE D'INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

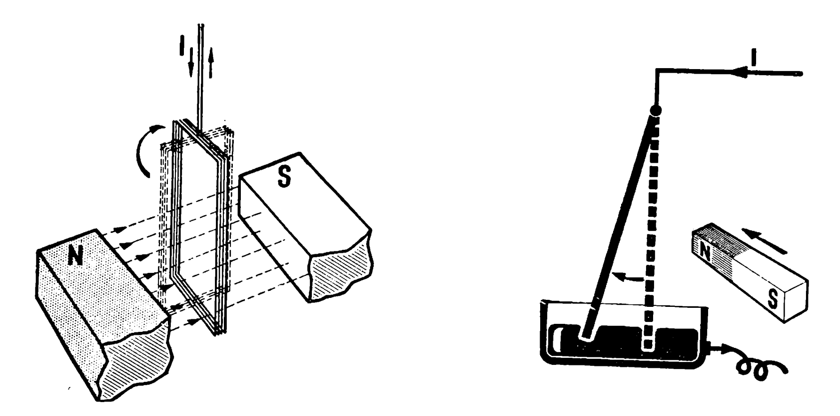
Dans le cas où l'induction électromagnétique est produite par déplacement, le circuit induit est un générateur : il transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Réciproquement, un circuit, parcouru par un courant, *situé* dans un champ magnétique, peut se *déplacer* ou se déformer spontanément sous l'effet de forces électromagnétiques.

Un tel circuit, qui transforme de l'énergie électrique en énergie mécanique, constitue un moteur.

Exemples.

Une bobine plate est suspendue par un fil souple, dans l'entrefer d'un aimant, de telle façon que son plan soit parallèle aux lignes du flux. Lorsqu'elle est parcourue par un courant, elle tend à se placer perpendiculairement aux lignes du flux émis par l'aimant.



Un conducteur rigide, suspendu verticalement à un axe, est parcouru par un courant. Ce conducteur dévie de sa position d'équilibre dès qu'on approche de lui un aimant ; il prend une nouvelle position d'équilibre pour chaque position de l'aimant.

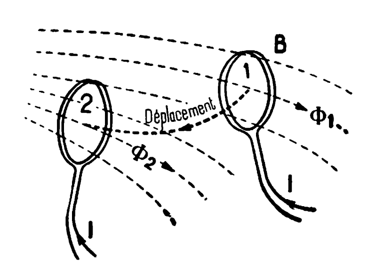
Ces phénomènes révèlent l'existence de forces électromagnétiques.

Nous étudierons le travail de ces forces dans des cas simples.

2. — DÉPLACEMENT D'UN CIRCUIT INDÉFORMABLE

Une bobine B est située dans un champ magnétique que traverse un flux invariable. Parcourue par un courant I maintenu constant, elle se déplace spontanément d'une position (1), où elle embrasse le flux total Φ_1, à une position (2) où elle embrasse le flux total Φ_2.

Au cours du déplacement, pendant un intervalle de temps dt (infiniment petit), la variation du flux embrassé par la bobine est $d\Phi$.



Cette bobine est le siège d'une force électromotrice induite $e = -\frac{d\Phi}{dt}$.

Cette force électromotrice s'oppose à la tension u (créée par la source), qui provoque le courant I (cause du déplacement) : e est une force contre-électromotrice, négative si u et rI sont comptés positivement.

La source entretient, aux bornes de la bobine B, de résistance r, la tension

$$u = rI + (-e) = rI + \frac{d\Phi}{dt}$$

Pendant ce temps dt, la source fournit l'énergie $uIdt$ transformée par ce récepteur en :

énergie thermique $w_1 = rI^2\,dt$,

énergie mécanique $w_2 = (-e)\,I\,dt = \frac{d\Phi}{dt} \times I\,dt = I\,d\Phi$.

Pour le déplacement total de la position (1) à la position (2), le travail effectué a pour valeur $W = \Sigma w_2 = I \times \Sigma\, d\,\Phi$,

$\Sigma\, d\,\Phi$, somme des variations élémentaires de flux, est la variation $\Delta\Phi$ du flux total $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$.

Le travail des forces électromagnétiques s'exprime par

$$\boxed{W = I \times \Delta\Phi}$$

W joules,
I ampères,
$\Delta\Phi$ webers.

Remarque.

Dans le cas *du déplacement spontané*, le circuit est moteur, il est soumis à des forces électromagnétiques qui effectuent un travail positif $W = I\,\Delta\Phi$, I et $\Delta\Phi$ sont donc de même signe, *le flux embrassé par le circuit est croissant.*

Dans le cas où l'on impose au circuit un déplacement en sens inverse, le travail des forces extérieures agissantes est moteur, le travail des forces électromagnétiques est résistant, c'est un travail négatif, I et $\Delta\Phi$ sont de signes contraires. Ce cas se présente précisément au cours de la production d'un courant induit par déplacement d'un circuit fermé dans un champ magnétique.

3. — DÉFORMATION D'UN CIRCUIT

Sans champ extérieur, un circuit peut se déformer spontanément sous la seule action du courant qui le parcourt (force électrodynamique, leçon 4). Il peut donc produire un travail.

Dans un champ extérieur, ce circuit déformable est sollicité par des forces électrodynamiques et des forces électromagnétiques ; le phénomène est complexe.

Plaçons-nous dans un cas particulier : le circuit est parcouru par un courant maintenu constant ; dans le champ magnétique extérieur, la répartition du flux est invariable. Supposons que le flux émis par le circuit soit très petit par rapport au flux extérieur.

Dans ces conditions, nous pouvons négliger le travail d'autodéformation du circuit et calculer le travail W produit par l'action du flux extérieur sur le circuit : un raisonnement identique à celui du paragraphe précédent conduit à la même relation $W = I \times \Delta\Phi$.

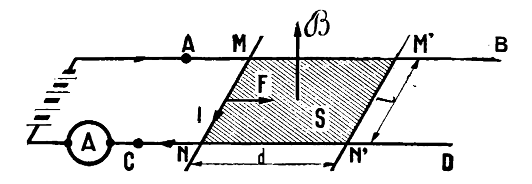
Dans le cas de *la déformation spontanée*, le circuit fournit un travail moteur positif, I et $\Delta\Phi$ sont de même signe, la déformation *s'effectue dans le sens provoquant un accroissement de flux.*

III. — EXPRESSION DE LA FORCE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

I. — EXPÉRIENCE

Un circuit déformable est constitué par deux tiges horizontales AB et CD réunies en A et C à une source et, en M et en N, par un conducteur rectiligne mobile, restant perpendiculaire à ces tiges.

Le plan ABCD est perpendiculaire à un flux inducteur uniformément distribué et constant ; la source débite un courant maintenu constant dans le circuit AMN'C.



L'élément rectiligne MN se déplace spontanément sous l'effet de forces électromagnétiques dans le sens qui entraîne une variation positive du flux embrassé par le circuit. Un dispositif de freinage astreint ce déplacement à être très lent.

2. — FORMULE DE LAPLACE [1]

Pour un déplacement d de l'élément MN de longueur l, la résultante F des forces électromagnétiques agissant sur ce conducteur a effectué le travail :

$$W = F \times d \qquad (1)$$

D'autre part, nous pouvons appliquer la relation

$$W = I\,\Delta\Phi \qquad (2)$$

Si $\mathcal{B}$ est l'induction magnétique dans le milieu considéré,

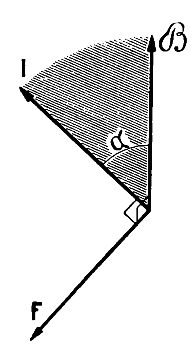
$$\Delta\Phi = \mathcal{B} \times S = \mathcal{B} \times l \times d \text{ (S surface balayée par MN).}$$

En tenant compte des relations (1) et (2), nous pouvons écrire :

$$F \times d = I \times \mathcal{B}ld.$$

c'est-à-dire $\boxed{F = \mathcal{B}Il}$ [2] F newtons, $\mathcal{B}$ Wb/m², I ampères, l mètres.

Cette relation, appelée formule de Laplace, exprime la force électromagnétique F *à laquelle est soumis un élément rectiligne de longueur l, parcouru par le courant* I *orthogonal au vecteur induction, dans une région du champ où l'induction magnétique est* $\mathcal{B}$.



Remarque.

Dans le cas où le conducteur l forme un angle α avec le vecteur $\vec{\mathcal{B}}$, la formule de Laplace s'écrit :

$$F = \mathcal{B}Il \sin\alpha.$$

Si l'élément MN est parallèle à $\vec{\mathcal{B}}$, la force F est nulle.
Si l'élément MN est perpendiculaire à $\vec{\mathcal{B}}$, la force F est maximum.

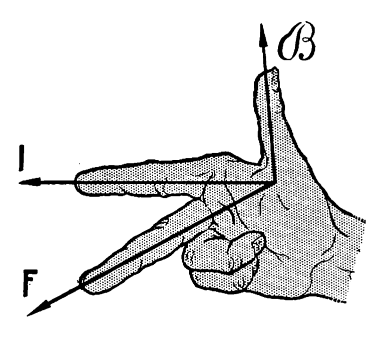
3. — DIRECTION ET SENS DE LA FORCE

La force électromagnétique F est normale au plan défini par $\vec{\mathcal{B}}$ et l, son sens peut être déduit de celui du déplacement de l'élément mobile qui entraîne une variation positive du flux embrassé par son circuit.

---

(1) Laplace : physicien français (1749-1827).

(2) Si $\mathcal{B}$ est évalué en gauss, I en ampères, l en cm, F est *exprimée* en dynes par : $0{,}1\ \mathcal{B}Il$.



On utilise souvent un procédé pratique pour déterminer ce sens :

Règle des trois doigts de la main droite [1].

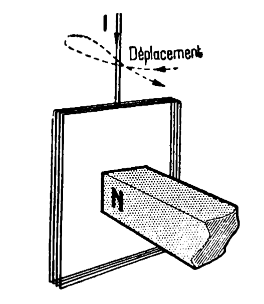
Trois doigts, formant un trièdre trirectangle, considérés dans l'ordre *pouce-index-majeur*, correspondent respectivement aux vecteurs ℬ, I, F (I est le courant des électrons).

4. — RÈGLE DU FLUX MAXIMUM

Le déplacement et la déformation spontanés d'un circuit, sous l'effet des forces électromagnétiques, sont tels que le flux total Φ *embrassé par le circuit augmente.*

(Le signe du flux total embrassé est lié au sens du courant dans le circuit.)

Ce fait est général, quel que soit le mode de variation du flux à travers le circuit (nous l'avons signalé dans cette leçon, § II).





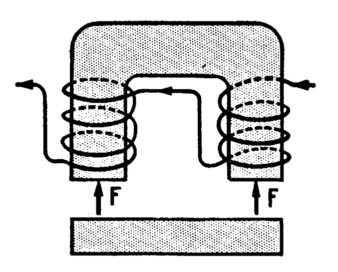
Exemples.

Une bobine mobile est parcourue par un courant ; en regard de sa face nord *n*, on présente un pôle nord N d'un aimant.

La bobine s'écarte, se retourne, et vient présenter sa face sud *s* au pôle N de l'aimant.

Au cours de ce déplacement, le flux émis par l'aimant à travers la bobine a varié

$$\text{de} - |\Phi| \text{ à } + |\Phi|$$



Un noyau magnétique en U, portant un enroulement parcouru par un courant, attire une armature de fer.

La réluctance du circuit magnétique décroît à mesure que l'entrefer diminue : le flux embrassé par l'enroulement croît.

Conséquence.

Pour un circuit, parcouru par un courant, susceptible de déplacements ou de déformations, et placé dans un champ magnétique, ***la position d'équilibre stable vers laquelle tend le système est celle qui correspond au flux maximum embrassé par le circuit.***

---

(1) Avec le sens conventionnel du courant la règle des trois doigts de la main droite *utilise* : pouce, index, majeur *correspondant* à champ, chemin, courant.

EXERCICES

1 — Une bobine plate mobile de 20 spires de 10 cm² de section chacune est placée dans un entrefer où l'induction magnétique $\mathcal{B} = 0{,}05$ Wb/m² est uniforme.
Les faces de la bobine sont initialement parallèles aux lignes du flux.
On fait passer un courant constant de 0,1 A dans la bobine, celle-ci tourne et se place dans la position où elle embrasse le maximum de flux.
Calculer le travail des forces électromagnétiques au cours du déplacement (on néglige la variation de $\mathcal{B}$ due à l'action magnétique du courant dans la bobine).

Réponse : 10^{-4} J.

2 — Calculer la force électromagnétique à laquelle est soumis un conducteur parcouru par un courant de 12 A lorsqu'il traverse, sur une longueur de 8 cm, normalement aux lignes du flux, un entrefer où l'induction est uniforme et égale à 0,1 Wb/m².

Réponse : 0,096 N.

3 — A l'intérieur d'une bobine (supposée très longue) constituée par un enroulement de 20 spires par centimètre de longueur, parcourue par un courant de 3 A, on a placé, ayant même axe que la bobine, une roue en aluminium ayant 12 rayons de 4 cm de longueur.
Une source débite entre l'axe et la jante de la roue, par l'intermédiaire de deux frotteurs, un courant de 9,6 A. (On supposera que les résistances sont négligeables et que ce courant ne modifie pas le flux de la bobine.)
Calculer la force électromagnétique s'exerçant sur chaque rayon et le couple moteur auquel est soumise cette roue au démarrage.

Réponses : 24×10^{-5} N ; 576×10^{-7} m . N.

4 — Sur la face supérieure d'une bobine à noyau de fer, dont l'axe est vertical, on pose à plat un anneau conducteur léger centré sur l'axe ; si l'on établit un courant assez important dans la bobine, au même instant l'anneau se soulève ; expliquer ce phénomène.

5 — Deux bobines longues B et *b* sont placées sur le même axe, bout à bout, une face en regard. Le pas des spires de B est « à gauche », celui des spires de *b* est « à droite ». On établit dans B un courant inducteur se dirigeant vers *b* ; *b* est en circuit fermé. Déterminer le sens du courant induit dans *b* à l'établissement du courant dans B.

Réponse : même sens que le courant inducteur, sens repéré sur l'axe orienté.

6 — Dans le problème précédent, on suppose le courant établi et constant dans la bobine B ; on introduit alors un noyau de fer dans cette bobine, on constate l'apparition d'un courant induit dans *b*.
Expliquez le phénomène et préciser le sens du courant induit.

Réponse : même sens que dans le cas précédent.

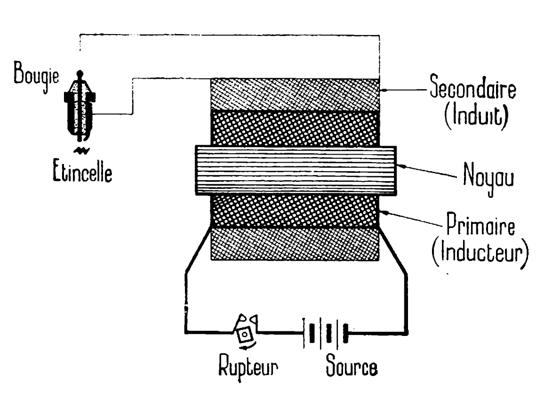
7 — Un conducteur rectiligne rigide OA, de section constante, suspendu à un axe O, est susceptible d'osciller dans un plan vertical perpendiculaire à un flux uniformément réparti d'induction magnétique $\mathcal{B} = 0{,}08$ Wb/m². Ce conducteur, pesant 20 g, a une longueur de 10 cm, il est parcouru par un courant de 5 A (alimentation entre l'axe O et une glissière en contact avec A).
Déterminer l'angle que forme le conducteur OA avec la verticale quand il a atteint sa position d'équilibre (les frottements sont négligés).

Réponse : $\alpha = 11°40'$ environ.

25. — Applications de l'induction électromagnétique

I. — DIVERS ASPECTS DU PHÉNOMÈNE

La valeur instantanée de la force électromotrice induite est donnée par la relation fondamentale $e = -\frac{d\Phi}{dt}$, quelle que soit la cause de la variation de flux (ou du flux coupé) $d\Phi$ pendant le temps dt (infiniment petit).

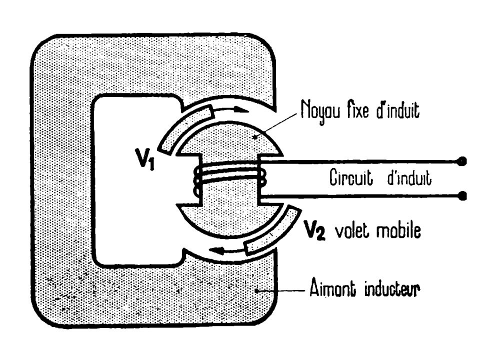


a. **Déplacement relatif de l'induit par rapport à l'inducteur.**

C'est le cas d'un bobinage induit tournant dans le champ d'un inducteur fixe : ce dispositif est utilisé dans les machines génératrices de courant continu.

b. **Variation de la force magnétomotrice d'un inducteur.**

On l'obtient par variation du courant inducteur ; par exemple, dans les bobines d'induction employées pour l'allumage des moteurs à essence.



c. **Variation de la réluctance du circuit magnétique inducteur.**

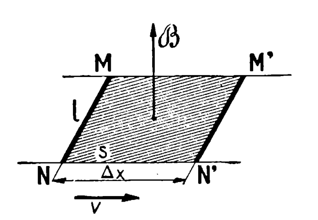
On l'obtient par déplacement d'un élément ferromagnétique mobile, faisant partie du circuit magnétique inducteur.

Principe des magnétos à volets tournants utilisées, également, pour l'allumage des moteurs à essence.

II. — ÉTUDE D'UN CONDUCTEUR ACTIF

1. — FORCE ÉLECTROMOTRICE INDUITE

Soit un élément conducteur rectiligne MN, de longueur l, effectuant la translation d'amplitude Δx, perpendiculaire à l, dans un plan normal aux lignes d'un flux uniformément réparti, d'induction magnétique $\mathcal{B}$.



Cet élément balaye l'aire $s = l \times \Delta x$.
Il coupe en un temps Δt le flux

$$\Delta\Phi = \mathcal{B} \times s = \mathcal{B} l \, \Delta x.$$

La force électromotrice moyenne induite dans cet élément est :

$$E_{moy.} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \mathcal{B} l \frac{\Delta x}{\Delta t}.$$

$\frac{\Delta x}{\Delta t}$ est la vitesse moyenne du déplacement, par suite $E_{moy.} = \mathcal{B} l \, V_{moy}$

Si le déplacement s'effectue à vitesse constante, cette force électromotrice $E = \mathcal{B} l v$ est constante.

Généralisation.

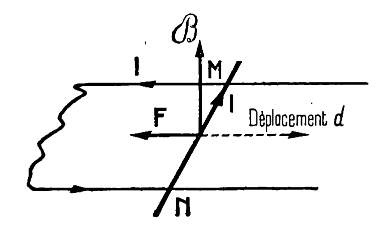
Si le mouvement est quelconque, à un instant donné, pour un déplacement très court dx, effectué dans un intervalle de temps très petit dt, on a, de la même façon : $|e| = \left|\frac{d\Phi}{dt}\right| = \mathcal{B} l \left|\frac{dx}{dt}\right|$, c'est-à-dire :

$$\boxed{|e| = \mathcal{B} l v}$$ (1)

relation dans laquelle e et v sont des grandeurs instantanées : e exprimée en volts, $\mathcal{B}$ en webers par mètre carré, l en mètres et v en mètres par seconde.

2. — SENS DU COURANT INDUIT

Si le circuit induit est fermé, la force électromotrice d'induction y provoque le courant I, le conducteur actif MN est un générateur.



(1) Si $\mathcal{B}$ est exprimée en gauss, l en centimètres et v en cm/s, E volts = 10^{-8} $\mathcal{B} l v$.

La force électromagnétique F (qui résulte de l'induction magnétique $\vec{\mathcal{B}}$ et du courant I) est une force résistante qui s'oppose au déplacement $\vec{d}$.

Connaissant le sens de la force F, opposée à celui de d, et le vecteur $\vec{\mathcal{B}}$, on peut déterminer le sens du courant I (leçon 24, règle des trois doigts de la main droite avec $\vec{\mathcal{B}}$, $\vec{I}$, $\vec{F}$).

On peut aussi utiliser un procédé direct.

Règle des trois doigts de la main gauche [1] : considérés dans l'ordre pouce-index-majeur, ils correspondent respectivement aux vecteurs $\vec{\mathcal{B}}$, $\vec{I}$, $\vec{d}$. (*Ici*, I représente le courant des électrons.)

III. — COURANTS DE FOUCAULT

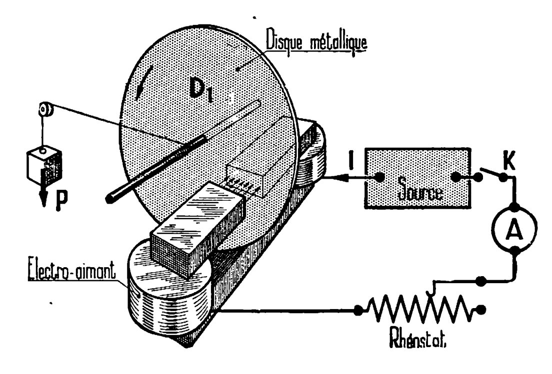
I. — EXPÉRIENCE

Nous disposons d'un disque conducteur, à axe horizontal. pouvant être entraîné dans un mouvement de rotation par la chute d'un corps de poids P.

Le disque passe dans l'entrefer d'un électroaimant, dispositif comportant deux noyaux N, S, aimantés par des bobines inductrices ; le plan du disque est normal aux lignes du flux.

a. **L'électroaimant n'est pas alimenté ;** le disque entraîné par le poids P prend un mouvement uniformément accéléré.

b. **L'électroaimant est alimenté par un courant I** ; le mouvement du disque, entraîné par le même poids, est nettement freiné et tend à devenir uniforme.



Pour un courant I′ supérieur à I, le disque acquiert une vitesse plus faible que dans le cas précédent.

(1) En utilisant le sens conventionnel du courant, cette règle des trois doigts de la main gauche relative au courant induit peut s'énoncer : pouce, index, majeur, correspondant respectivement à *champ* ($\vec{\mathcal{B}}$), *chemin* ($\vec{d}$), *courant* ($\vec{I}$).

2. — INTERPRÉTATION

Ce disque dont les rayons « coupent du flux » est freiné.

D'une manière générale, toute pièce conductrice qui coupe du flux est le siège de forces électromotrices induites.

Lorsque la pièce induite est massive, il se développe en elle des courants induits, dont les circuits sont mal définis.

Ces courants sont appelés ***courants de Foucault.***

Ces courants induits s'opposent à la cause qui leur a donné naissance (loi de Lenz).

Dans l'expérience précédente, ils s'opposent à la rotation du disque induit dans l'entrefer de l'électroaimant inducteur, d'où freinage du mouvement.

3. — ÉNERGIE ABSORBÉE

Les courants de Foucault, opposant au mouvement un couple résistant, absorbent une partie de l'énergie du travail moteur. L'énergie ainsi absorbée se traduit par un dégagement de chaleur (par effet joule dans le disque).

Remarque.

Il y a, d'une manière analogue, apparition de courants de Foucault dans toute pièce conductrice traversée par un flux variable. Il en est ainsi pour toutes les pièces métalliques qui font partie de circuits magnétiques dont les bobinages sont alimentés en courant variable.

Le phénomène est particulièrement important avec les courants alternatifs.

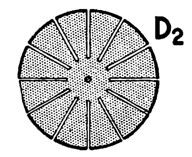
Ces pièces sont le siège d'un dégagement de chaleur, et cette énergie thermique se manifeste au détriment du rendement des appareils.

4. — APPLICATIONS

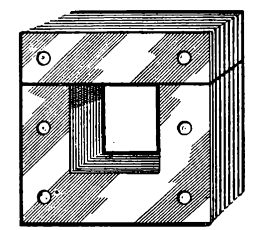
a. Réduction des courants de Foucault.

Dans l'industrie électromécanique, la réalisation de moteurs et de génératrices à haut rendement implique la recherche des moyens propres à diminuer les courants de Foucault.

Dans l'expérience précédente, si nous remplaçons le disque plein D_1 par un disque de même métal D_2, de mêmes dimensions, mais présentant radialement des traits de scie, le freinage par courants de Foucault est moins important ; la circulation des courants parasites est gênée par les fentes.



On parvient à réduire notablement ces courants, en conséquence l'énergie perdue, en remplaçant les pièces massives par des empilages de tôles isolées convenablement (papier ou vernis).



Les plans des coupures sont perpendiculaires à la direction générale des courants de Foucault qui tendraient à s'établir.

On réduit de même ces courants en augmentant la résistivité des métaux faisant partie des circuits magnétiques (noyaux, carcasses...) par l'emploi d'acier au silicium par exemple.

b. Pertes dans le fer.

Les pertes d'énergie par hystérésis (leçon 22) et les pertes d'énergie par courants de Foucault dépendent des variations de l'induction magnétique $\mathcal{B}$ dans le fer et de la fréquence de ces variations.

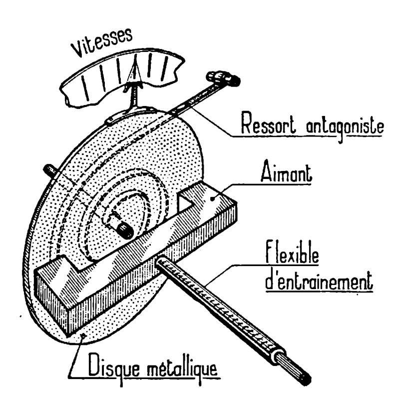
Elles constituent les *pertes dans le fer*, par opposition aux *pertes dans le cuivre* dues à l'effet joule dans les conducteurs.

Ces notions interviennent d'une manière permanente dans l'étude du rendement des machines.

c. Utilisation des courants de Foucault.

Des fours à induction utilisent la chaleur dégagée par courants de Foucault dans des masses conductrices, ils sont alimentés par des courants variables.

On utilise le freinage par courants de Foucault pour l'*amortissement des oscillations de certains appareils de mesure*, c'est le cas des ampèremètres à cadre mobile : le cadre est bobiné sur une carcasse d'aluminium ou de cuivre pivotant dans le champ de l'aimant inducteur.



Certains compteurs de vitesse pour automobiles utilisent l'entraînement par courants de Foucault.

Un aimant tourne à la vitesse à mesurer en face d'un disque métallique mobile autour du même axe.

Ce disque est entraîné dans le sens de la rotation de l'aimant par des actions électromagnétiques dues aux courants de Foucault.

Un ressort spiral de rappel immobilise le disque à une position d'équilibre, fonction de la vitesse de rotation de l'aimant.

EXERCICES

1 — Dans un entrefer de section carrée de 8 cm de côté, où l'induction magnétique $\mathcal{B} = 0{,}5$ Wb/m² est uniforme, on déplace un conducteur rectiligne débordant cet entrefer.
Le mouvement est uniforme, de vitesse 2 m/s dans un plan de section droite du flux :
a. Le conducteur reste parallèle à un côté du carré et sa vitesse lui est perpendiculaire, calculer la force électromotrice induite dans le conducteur.
b. Le conducteur reste parallèle à une diagonale du carré, sa vitesse lui est perpendiculaire, que peut-on dire de la force électromotrice induite ?

Réponses : a. *0,08 V;* b. *La f. é. m. induite est variable, elle passe par un maximum quand le conducteur coïncide avec la diagonale.*

2 — *a.* Un barreau conducteur rectiligne horizontal AB de 6 cm de longueur, guidé par deux glissières verticales (on néglige les frottements ainsi que la résistance de l'air), tombe sous l'action de la pesanteur dans un plan perpendiculaire à un flux uniformément réparti, où l'induction magnétique est $\mathcal{B} = 1$ Wb/m². Comment varie la force électromotrice d'induction, que l'on peut mesurer entre les glissières en circuit ouvert pour une chute de 10 cm sans vitesse initiale ?
b. Ce même barreau peut être entraîné à vitesse constante, les glissières réunies par un conducteur constituant avec le barreau un circuit fermé de résistance 0,1 Ω. En négligeant l'action magnétique du courant induit sur le flux inducteur et sur son propre circuit, calculer la vitesse pour laquelle la force électromagnétique qui s'oppose au mouvement est égale à 1 gp.

Réponses : a. *E varie comme* v, *proportionnelle au temps; E varie de 0 à 0,084 V;* b. *27,3 cm/s.*

3 — Une pièce métallique pesant 60 g tombe sous l'effet de la pesanteur, elle traverse un entrefer et, à 50 cm de son point de départ (sans vitesse initiale), sa vitesse est de 200 cm/s. Calculer l'énergie absorbée par les courants de Foucault qui ont freiné cette chute (on néglige la résistance de l'air, $g = 9{,}81$ m/s²).

Réponse : 0,174 J.

4 — Un cylindre en cuivre creux, à axe vertical, est mobile autour de cet axe. A l'intérieur de ce cylindre, mobile lui aussi autour du même axe, un barreau aimanté horizontal est suspendu par un pivot. Cylindre et barreau n'ont aucune liaison mécanique.
a. On fait tourner le barreau, le cylindre est entraîné dans le même sens de rotation.
b. On fait tourner le cylindre, le barreau est entraîné dans le même sens de rotation.
Expliquez ces phénomènes.

Réponse: entraînement par courants de Foucault.



26. — Appareils de mesure

I. — ROTATION CONTINUE

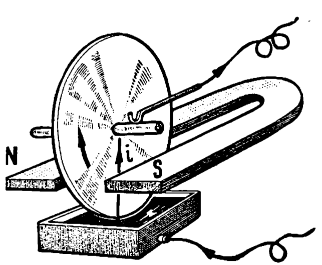
Roue de Barlow.

Le courant I, fourni par une source, parcourt, dans le disque métallique, un trajet assimilable à un rayon, entre l'axe et un godet de mercure reliés au générateur.

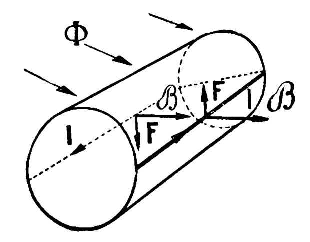
Les lignes du flux produit par l'aimant fixe NS sont normales à ce rayon actif.

Cet élément de courant est soumis à une force électromagnétique F ; pour un courant suffisant (frottements à vaincre), F provoque la rotation du disque.

La rotation est entretenue par l'action des forces électromagnétiques appliquées aux rayons successifs qui viennent remplacer le premier rayon actif.



Principe du moteur à courant continu.



Dans l'entrefer d'un inducteur fixe, des conducteurs rectilignes, disposés suivant les génératrices d'un cylindre mobile (rotor), sont parcourus par un courant I de sens convenable. Ces conducteurs sont soumis à des forces électromagnétiques, dont les moments par rapport à l'axe de rotation sont en concordance pour former le moment du couple résultant, le couple moteur.

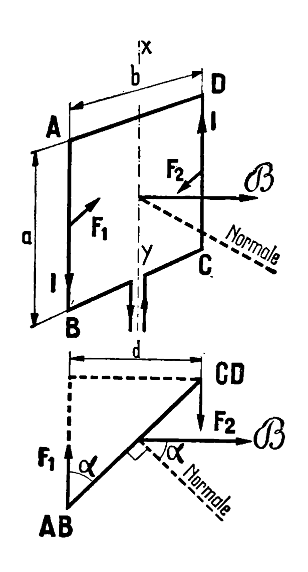
2. — COUPLE EXERCÉ SUR UN CADRE RECTANGULAIRE

a. Dans un champ uniforme.

Le cadre ABCD est mobile autour de l'axe XY parallèle à AB ; les lignes du flux, uniformément distribué, sont perpendiculaires à cet axe.

Parcouru par un courant I, le cadre tend à se placer perpendiculairement aux lignes de flux (règle du flux maximum).

Maintenu dans une position quelconque, définie par l'angle α que fait la normale au cadre avec le vecteur $\vec{\mathcal{B}}$ (direction origine), ce cadre est soumis à un couple électromagnétique.



Raisonnons sur une spire :

— les côtés AB et CD, de longueur a, orthogonaux au vecteur $\mathcal{B}$, sont soumis respectivement à deux forces F_1 et F_2 égales, parallèles et de sens contraires, déterminées par la formule de Laplace $F_1 = \mathcal{B}Ia$;

— les côtés BC et AD, de longueur b, sont soumis à des forces électromagnétiques directement opposées, portées par l'axe de rotation ; ces forces tendent à déformer le cadre, nous supposerons celui-ci indéformable.

Seuls les côtés AB et CD constituent les conducteurs actifs pour la rotation.

Le moment du couple (F_1, F_2) est $M_1 = F_1 \times d$. Or $d = b \sin \alpha$; par suite, $M_1 = \mathcal{B}Iab \sin \alpha$.

En posant $ab = s$, surface du cadre, $M_1 = \mathcal{B}Is \sin \alpha$.

Si le cadre porte N spires, les actions sur leurs conducteurs actifs sont concordantes, le moment résultant qui agit sur le cadre est :

$$\boxed{M = N\mathcal{B}Is \sin \alpha,}$$

M mètres.newtons.
$\mathcal{B}$ webers/m².
I ampères, s mètres carrés.

b. **Dans un flux radial.**

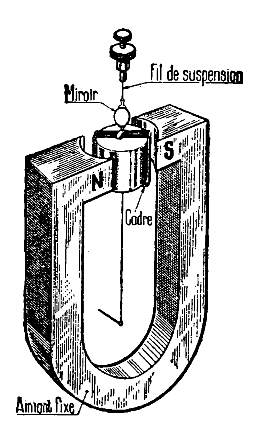
Ce cas est réalisé dans les galvanomètres à cadre mobile.

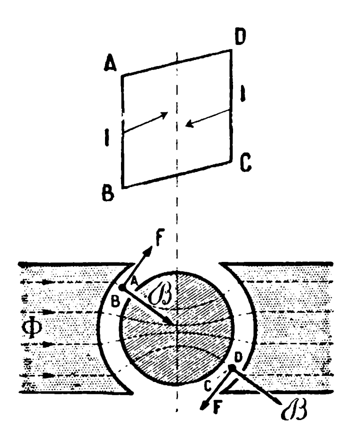
1° ***Principe.***

Le cadre, suspendu par un fil de torsion, est mobile dans l'entrefer limité par les pièces polaires évidées d'un aimant inducteur et par un cylindre de fer doux. Les lignes de flux sont perpendiculaires à l'axe de rotation (axe du cylindre et de l'entrefer) et normales à l'entrefer.

Pour une position quelconque du cadre dans cet entrefer, les côtés AB et CD, de longueur a, sont l'objet de forces électromagnétiques F_1 et F_2 égales, parallèles, de sens contraires, normales au plan du cadre.

Les côtés BC et AD, de longueur b, sont parallèles au vecteur $\mathcal{B}$ et ne sont l'objet d'aucune force électromagnétique.





Le moment des forces F_1, F_2 appliquées à une spire est

$$M_1 = F_1 \times b = \mathcal{B}Iab = \mathcal{B}Is \text{ (s surface d'une spire).}$$

L'induction magnétique $\mathcal{B}$ conserve la même valeur pour les diverses positions du cadre dans l'entrefer.

Le couple électromagnétique résultant appliqué aux N spires a pour moment $M = \mathcal{B}IsN$.

Ce couple est indépendant de la position du cadre dans l'entrefer.

Étant donnée une déviation α du cadre, à partir d'une position initiale pour laquelle la torsion du fil de suspension est nulle, ce fil exerce un couple mécanique de rappel de moment $M' = C\alpha$.

C'est la constante de torsion du fil.

La position d'équilibre du cadre est atteinte lorsque :

$$\text{Couple moteur} = \text{Couple de rappel},$$

c'est-à-dire $M = M'$; d'où $\mathcal{B} I s N = C\alpha$.

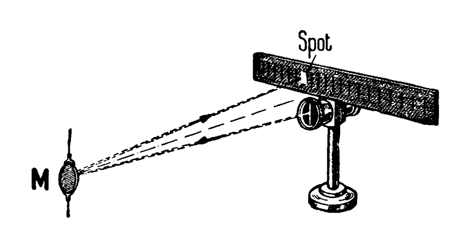
Le courant I que décèle ce galvanomètre s'exprime par $I = \dfrac{C}{\mathcal{B} s N} \times \alpha$.

Le courant I est proportionnel à la déviation α du cadre mobile.

2° ***Réalisation.***

Le cadre d'un tel galvanomètre est souvent un rectangle de quelques centimètres carrés, aussi léger que possible ; il comporte quelques centaines de spires en fil très fin (0,1 mm environ), suspendues par un fil conducteur (fil d'argent de 0,1 mm environ).

Un petit miroir concave, collé au cadre, est entraîné dans la rotation (distance focale usuelle : $f = 50$ cm) ; il permet la mesure de l'angle de rotation par la méthode de Poggendorf (voir cours d'optique).



Le rayon lumineux, réfléchi par le miroir, ne présente pas d'inertie et dévie de 2α quand le cadre tourne de l'angle α.

Le spot, image de la source lumineuse, se forme sur une règle écran située à distance $2f$ du miroir *m*.

Un galvanomètre à cadre mobile peut déceler un courant de l'ordre de 0,001 μA.

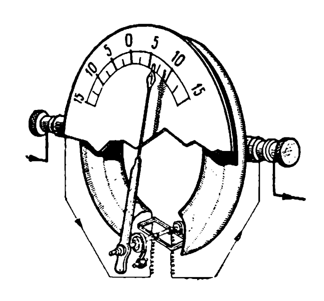
Le sens de la déviation du cadre et, par suite, celle du spot, dépend du sens du courant dans le cadre.

En général, les galvanomètres ne sont pas utilisés pour mesurer un courant, mais pour le déceler (application aux mesures par méthode de zéro).

Ils sont très fragiles et ne peuvent supporter que des courants très faibles (très inférieurs à 1 mA) ; on peut les utiliser avec shunt pour diminuer leur sensibilité.

c. **Ampèremètres et voltmètres magnétoélectriques,** à cadre mobile.

Le même principe est utilisé dans la réalisation des ampèremètres à cadre mobile (leçon 5), et des voltmètres à cadre mobile (en ajoutant une grande résistance en série avec le cadre, leçon 8).



Ces appareils sont plus robustes que le galvanomètre, leur cadre est monté sur pivots, il entraîne une aiguille mobile en face d'un cadran gradué.

Le couple antagoniste est obtenu par l'emploi de ressorts spiraux.

Le sens de la déviation de l'aiguille dépend du sens du courant (appareils polarisés).

Les traits de la graduation sont équidistants.

3. — ACTION D'UN COURANT SUR UN COURANT

a. Action réciproque de deux courants parallèles très longs.

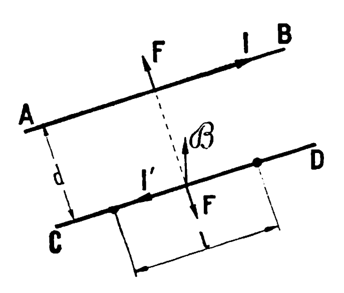
Nous avons signalé l'existence des forces électrodynamiques s'exerçant sur deux conducteurs parallèles parcourus par un courant (leçon 5).

Calculons la force électrodynamique s'exerçant sur un élément de longueur l.

Le conducteur AB, parcouru par le courant I, crée le long du conducteur CD, situé à distance d de AB, l'induction magnétique $\mathcal{B} = \frac{2\,I}{10^7\,d}$.

En chaque point de CD, cette induction magnétique $\mathcal{B}$ est perpendiculaire au conducteur CD.

Un élément de longueur l, de ce conducteur, parcouru par le courant I′, est soumis à une force électromagnétique F (nous l'avons appelée électrodynamique, dans ce cas particulier), $F = \mathcal{B}I'l$, c'est-à-dire :



$$F = \frac{2}{10^7}\,\frac{II'l}{d}$$

F newtons.
I et I′ ampères.
l et d mètres.

Dans le cas où $I = I' = 1$ A et $l = d = 1$ m, on a $F = \frac{2}{10^7}$,

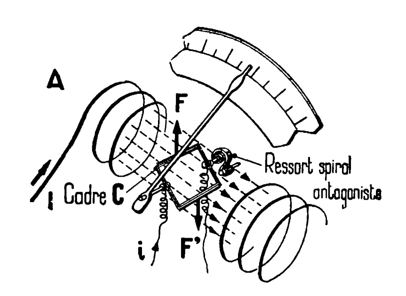
cette valeur a été signalée dans la définition légale de l'ampère.

Compte tenu du sens du courant I dans le conducteur AB, le sens du vecteur $\mathcal{B}$ le long de CD est déterminé ; la règle des trois doigts appliquée à l'induction $\mathcal{B}$ et au courant I′ détermine le sens de la force F, nous retrouvons la propriété constatée expérimentalement :

deux courants de sens contraires se repoussent, deux courants de même sens s'attirent.

b. **Principe des appareils électrodynamiques.**

A l'intérieur d'une bobine A, parcourue par un courant I, l'induction magnétique $\mathcal{B}$ est proportionnelle à ce courant I.



Un cadre mobile C, dont l'axe de rotation est perpendiculaire aux lignes du flux émis par A, est, pour une orientation quelconque, soumis à un couple électromagnétique dès qu'il est parcouru par un courant *i* (action d'un champ magnétique uniforme sur un cadre mobile).

Le couple moteur est proportionnel à l'induction magnétique $\mathcal{B}$, donc au courant I, il est d'autre part proportionnel au courant *i*.

Ce couple électrodynamique est donc proportionnel au produit $I \times i$.

Le couple résistant peut être créé par un ressort spiral.

L'ensemble constitue un appareil électrodynamique qui mesure le produit $I \times i$.

Si la bobine A et le cadre C sont en série $I = i$, l'appareil mesure I^2, c'est un *ampèremètre électrodynamique.* (Le cadre C en fil fin est souvent monté aux bornes d'un shunt.)

On réalise sur le même principe des *voltmètres électrodynamiques* : le circuit comporte A et C en série avec une grande résistance additionnelle.

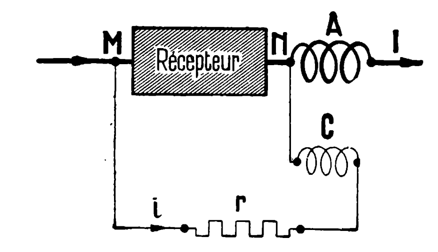
La déviation des ampèremètres et des voltmètres électrodynamiques est indépendante du sens du courant qui les traverse.

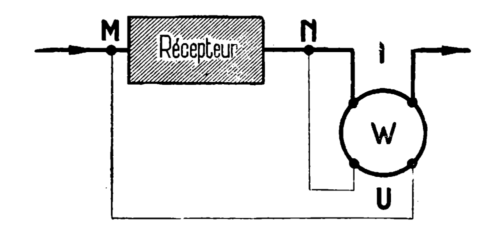
Les graduations du cadran ne sont pas équidistantes ; elles s'écartent, d'abord, à mesure que le courant croît, puis se resserrent.

La déviation maximum est inférieure à 180°.

Wattmètre.

La bobine A réalisée en gros fil, peu résistante, est *montée en série sur le circuit à étudier*, I est le courant qui traverse ce circuit : *la bobine A constitue une partie du circuit du courant principal* (circuit des « ampères »).





Le cadre C, équipage mobile léger, réalisé en fil fin, monté en série avec une grande *résistance additionnelle* r, *constitue le circuit de tension* (circuit des « volts ») ; ce circuit est branché en dérivation aux bornes du récepteur (ou de l'installation) *à contrôler.*

Le circuit de tension, de résistance très grande R, un peu supérieure à *r*, est parcouru par le courant *i*, proportionnel à la tension $U = Ri$ à ses bornes.

La déviation du cadre, qui mesure le produit $i \times I$, *mesure donc le produit* UI, *soit la puissance absorbée par le circuit étudié.*

L'appareil est gradué en watts.

EXERCICES

1 — Le disque d'une roue de Barlow peut tourner dans un plan vertical entre les pôles d'un aimant ; dans cet entrefer, l'induction $\mathcal{B} = 200$ Gs est uniforme et perpendiculaire au disque. Le flux magnétique n'intéresse le rayon en contact avec le mercure que sur une longueur de 2 cm, le point moyen de ce conducteur actif est à 6 cm de l'axe. Un courant constant de 10 A circule dans le rayon utile du disque ; quel est le couple moteur qui sollicite ce disque ?
Quelle est la puissance mécanique mise en jeu pour une vitesse de rotation de 1,5 t/s ?

Réponses : 24 × 10^{-5} m.N ; 2,26 .10^{-3}W.

2 — Dans un moteur à courant continu, les inducteurs fixes émettent un flux Φ ; chaque conducteur actif de l'induit, parcouru par le courant I et situé suivant une génératrice du rotor, coupe ce flux deux fois par tour. Pour $I = 12$ A et $\Phi = 0{,}0075$ Wb, calculer le travail des forces électromagnétiques agissant sur ce conducteur pour un tour du rotor.
Si le rotor comporte 400 conducteurs actifs et tourne à la vitesse de 1 200 tours/mn, calculer la puissance mise en jeu par les forces électromagnétiques.

Réponses : 0,18 J ; 1 440 W.

3 — Un galvanomètre à cadre mobile comporte un cadre rectangulaire de 3 cm × 4 cm, présentant 200 spires. Ce cadre, suspendu par un fil dont la constante de torsion est C = 20 unités C. G. S., pivote dans un entrefer où l'induction magnétique est radiale et constante en grandeur $\mathcal{B} = 500$ Gs. On peut apprécier, sur la règle graduée placée à 1 m du cadre, un déplacement du spot de 1 mm ; calculer le courant passant dans le cadre pour cette déviation (sensibilité de ce galvanomètre).

Réponse : 0,083 μA.

4 — Calculer la force électrodynamique appliquée à un élément de 2 m de longueur pris sur l'une des deux barres parallèles de distribution d'un courant constant de 10 000 A dans une usine d'électrométallurgie. Les deux barres sont distantes de 25 cm.

Réponse : 160 N ou 16,3 kgp.

5 — On veut étudier une installation d'éclairage en courant continu : on ne dispose comme appareil de mesure que d'un galvanomètre G à cadre mobile dont les caractéristiques sont : résistance intérieure 5 Ω ; un courant de 20 mA donne une déviation de 120 divisions.

On fait successivement les mesures suivantes :

a. le galvanomètre G est placé en série avec une résistance R = 5 495 Ω, l'ensemble est en dérivation entre les bornes A et B du secteur, on lit 112 divisions ;

b. le galvanomètre est placé en dérivation aux bornes d'une résistance $r = 5000\ \mu\Omega$, l'ensemble est monté en série avec l'installation, on lit 110 divisions.

On demande de calculer la tension du réseau, l'intensité du courant absorbé par l'installation, la puissance de l'installation, l'énergie consommée par le fonctionnement de l'installation pendant 3 heures et le coût de cette énergie au tarif de 28 F le kilowattheure. (B. E. I.)

Réponses : 102,5 V; 18,4 A ; 1 885 W; 158,3 F.

6 — Dans les figures montrant le branchement du wattmètre (page **176**,) sur un circuit alimentant un récepteur, le montage réalisé est le montage aval (le circuit des tensions est directement aux bornes du récepteur). Dans ce cas, la puissance indiquée par le wattmètre comporte : la puissance P absorbée par le récepteur augmentée de la puissance *p* absorbée par le fil fin du wattmètre. Expliquez cette remarque.

1° Quand la tension du récepteur est 120 V et l'indication du wattmètre 900 W, que valent *p* et P si la résistance du circuit fil fin est 2 400 Ω ?

2° Que peut-on dire de l'indication du wattmètre quand on effectue le montage amont, c'est-à-dire quand le circuit fil fin du wattmètre est aux bornes de l'ensemble récepteur + circuit gros fil du wattmètre ?

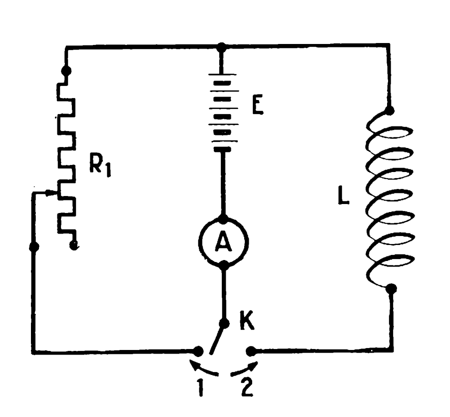
Réponses : p = *6 W; P = 894 W; la puissance indiquée comporte P augmentée de la puissance absorbée par le circuit gros fil.*



27. — Autoinduction

I. — PHÉNOMÈNE D'AUTOINDUCTION

1. — RETARD A L'ÉTABLISSEMENT DU COURANT DANS UN BOBINAGE



Un commutateur K permet de faire débiter une source de force électromotrice E :

— soit dans une résistance non bobinée, R_1 ;

— soit dans une bobine L, de même résistance R_1, mais présentant un très grand nombre de spires.

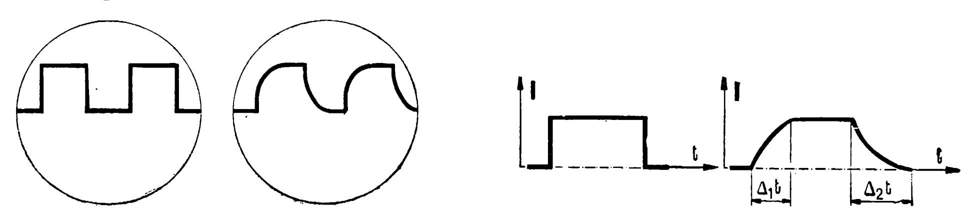
Un ampèremètre A, à déviation rapide (c'est-à-dire de très faible inertie), nous permet de constater que le courant I :

— s'établit très vite dans le premier circuit [position (1) de K] ;

— s'établit moins vite dans le second circuit [position (2) de K].

Dans les deux expériences la valeur de régime normal du courant I est la même, $I = \frac{E}{R}$; R est la résistance totale de chaque circuit.

Pour obtenir la représentation du courant *i* en fonction du temps, au cours de sa période d'établissement, utilisons un oscilloscope cathodique, monté en ampèremètre (avec balayage linéaire convenable). Un commutateur tournant réalise périodiquement l'ouverture et la fermeture de chaque circuit.



Nous obtenons pour l'un et l'autre circuit des courbes différentes.

Interprétation des résultats.

Le retard à l'établissement du courant dans le circuit de la bobine L est dû à un phénomène d'induction électromagnétique.

Pendant que le courant i croît de zéro à I, il produit à travers la bobine un flux croissant. Cette bobine est le siège d'une force électromotrice d'induction qui s'oppose à sa cause (loi de Lenz) : il y a freinage de l'établissement du courant i. Ce phénomène porte le nom d'autoinduction, on dit que la ***bobine présente de l'inductance et que son circuit est inductif.***

2. — RETARD A LA DISPARITION DU COURANT

Les courbes obtenues pour le circuit de la bobine montrent que le courant i ne s'annule pas instantanément.

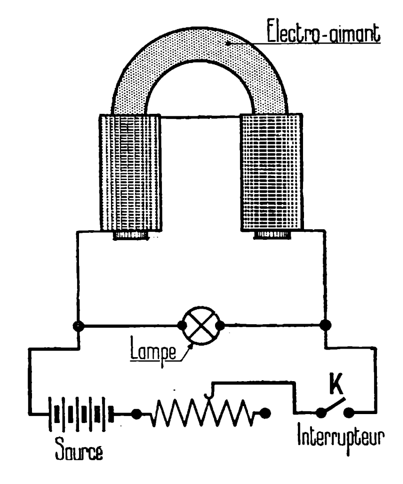
On constate, en particulier, à l'ouverture d'un circuit inductif, une étincelle au commutateur K, cette étincelle constitue un arc à travers lequel le courant continue à passer pendant un temps relativement court.

A l'ouverture de ce circuit, le courant i décroît de I à zéro ; le flux qui traverse la bobine L décroît, une force électromotrice induite d'autoinduction prend naissance dans cette bobine et, s'opposant à sa cause (loi de Lenz), retarde la disparition du courant.

Conclusion.

Toute variation de son propre flux, à travers un circuit, provoque dans celui-ci une force électromotrice d'autoinduction qui tend à s'opposer à cette variation.

Quand cette force électromotrice est notable, on dit que le circuit est inductif.



3. — SURTENSION DE COUPURE

Une lampe est branchée en dérivation aux bornes d'un bobinage important de résistance faible (par exemple un électro-aimant), l'ensemble est alimenté par une source de force électromotrice insuffisante pour faire briller la lampe.

A l'ouverture du circuit, la lampe brille d'un vif éclat pendant un temps très court : la variation très rapide du courant I dans le bobinage provoque une variation très rapide du flux, donc une très grande force électromotrice d'autoinduction. Dans le circuit de la lampe, le courant est intense.

A la fermeture du circuit, on voit encore la lampe briller un peu ; le courant s'établit plus vite dans la lampe de grande résistance que dans le bobinage très inductif.

La force électromotrice d'autoinduction crée aux bornes d'un circuit inductif, à l'ouverture du circuit, une tension U bien supérieure à la tension en régime normal.

II. — INDUCTANCE D'UN BOBINAGE

BOBINAGE SANS NOYAU MAGNÉTIQUE

Le flux total Φ embrassé par le circuit (somme des flux embrassés par chacune des spires) est proportionnel au courant I qui parcourt ce circuit :

$$\frac{\Phi}{I} = \text{Cte} = L, \quad \text{soit} \quad \Phi = LI.$$

Cette constante L est appelée inductance du circuit électrique.

Pour une variation dI du courant, pendant un intervalle de temps infiniment petit dt, la variation du flux total vaut $d\Phi = L \times dI$ et la force électromotrice d'auto-induction est $e = -\frac{d\Phi}{dt}$, ou $e = -L\frac{dI}{dt}$.

2. — UNITÉ D'INDUCTANCE. LE HENRY (1 H) [1]

Définition légale :

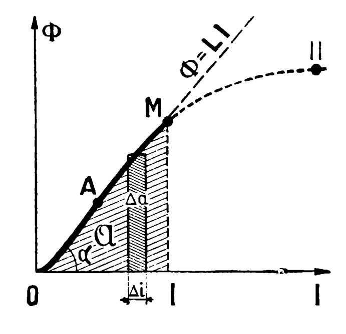
Le henry est l'inductance électrique d'un circuit fermé, dans lequel une force électromotrice de 1 V est produite lorsque le courant électrique qui parcourt le circuit varie uniformément à raison de 1 A par seconde.

La relation Φ = LI exprime qu'une inductance de 1 henry est traversée par un flux total de 1 weber quand elle est parcourue par un courant de 1 ampère.

3. — BOBINAGE AVEC NOYAU MAGNÉTIQUE

Considérons la courbe du flux magnétique Φ, en fonction du courant d'excitation I (voir courbe d'aimantation p. 140).

Pour un point figuratif A de cette courbe, le quotient $\frac{\Phi}{I} = L$ est représenté par $\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \widehat{IOA}$.



(1) Henry, physicien américain (1799-1878).

Pour la portion rectiligne de la courbe, jusqu'en M, $\text{tg}\,\alpha = L = \text{Cte}$, l'inductance du circuit est bien définie.

Pour la portion MN coudée (apparition de la saturation) et au delà, $\text{tg}\,\alpha$ n'est plus constante, L devient variable ; ce n'est plus une caractéristique du circuit.

III. — ÉNERGIE EMMAGASINÉE DANS UNE INDUCTANCE

Pendant le retard à l'établissement du courant, la source fournit de l'énergie à l'inductance autrement que sous forme thermique.

L'inductance joue le rôle d'un récepteur présentant une force contre-électromotrice qui est précisément la force électromotrice autoinduite.

Une partie de l'énergie électrique fournie par la source, non dissipée en chaleur, est emmagasinée dans le milieu (circuit magnétique), sous forme d'une énergie particulière appelée énergie électromagnétique.

L'inductance restitue cette énergie au moment de la rupture du courant (retard à la disparition du courant).

L'énergie emmagasinée par une inductance s'exprime par

$$\boxed{W = \frac{1}{2} LI^2}$$

W joules, L henrys, I ampères.

Remarque.

Pour un intervalle de temps Δt, très court, pendant lequel la variation du courant est ΔI, la force électromotrice d'autoinduction a pour valeur :

$$|e| = L \frac{|\Delta I|}{\Delta t}$$

(e et ΔI considérés en valeur absolue).

L'énergie électrique mise en jeu est $\Delta W = |e|\, I\, \Delta t$,

$$\Delta W = L \frac{\Delta I}{\Delta t} \times I \times \Delta t = LI\, \Delta I$$

Sur le graphique du flux $\Phi = LI$ en fonction du courant I, pour la partie rectiligne de la courbe où l'inductance L reste constante, ΔW est représentée par l'aire élémentaire du rectangle hachuré $\Delta a = LI \times \Delta I$.

Pour une variation totale du courant de 0 à I, l'énergie totale W emmagasinée, somme des énergies élémentaires ΔW, est représentée par l'aire totale du triangle OIA :

$$W = \mathcal{A} = \frac{1}{2} I \times LI = \frac{1}{2} LI^2.$$

IV. — IMPORTANCE DU PHÉNOMÈNE D'AUTOINDUCTION

1. — ANALOGIE

L'autoinduction joue en électricité un rôle analogue à celui de l'inertie en mécanique.

Un volant ralentit la vitesse de départ, emmagasine de l'énergie cinétique $\left(\frac{1}{2} J\omega^2, \text{ J moment d'inertie, } \omega \text{ vitesse angulaire}\right)$, et prolonge le mouvement en restituant cette énergie quand l'effort moteur a cessé.

2. — CONSÉQUENCES

La coupure d'un courant dans un circuit inductif produit à l'interrupteur une étincelle longue et chaude, que nous n'obtenons pas dans les mêmes conditions de courant et de tension, avec un circuit non inductif.

a. Cet effet est utilisé dans les allumoirs électriques.

b. Pour réduire la durée de l'arc de rupture, et ses effets destructeurs sur les pièces entre lesquelles il jaillit, on utilise souvent des interrupteurs à rupture brusque.

La réduction de la durée de coupure augmente la surtension due à l'autoinduction, cette solution peut présenter de graves dangers :

Électrocution. — On ne se méfie pas assez des circuits très inductifs, surtout quand ils sont alimentés en basse tension.

Par exemple, au cours des essais de mesure de résistance sur des bobinages importants (inducteurs de machines, enroulements de transformateurs), la coupure du courant peut entraîner une très grande force électromotrice d'autoinduction (plusieurs milliers de volts).

Détérioration des isolants prévus pour la tension de régime normal.

Dans le cas des circuits très inductifs, on évite ce risque en plaçant en dérivation aux ornes du circuit, au moment de la rupture, une résistance *r*, dite de décharge, à travers laquelle circule le courant dû à l'autoinduction.

On prévoit un montage anti-inductif pour l'emploi de certains moteurs (voir *Moteurs à courant continu*).

EXERCICES

1 — Le bobinage d'un électroaimant de résistance 3 Ω comporte 800 spires. Lorsque l'armature est collée aux pôles, pour un courant de 2 A dans le bobinage, l'induction magnétique dans le noyau de section 6 cm² est de 1,5 Wb/m². En supposant que la coupure du courant s'effectue en 0,005 seconde, calculer la force électromotrice moyenne d'autoinduction dans ce bobinage; la comparer à la tension aux bornes de l'enroulement en régime constant. On supposera que le noyau ne conserve pas de magnétisme rémanent.

Réponses : 144 V ; 6 V.

2 — Une longue bobine cylindrique sans noyau a un diamètre de 6 cm et porte 750 spires sur une longueur de 30 cm. En supposant le flux constant dans toutes les spires, calculer, pour un courant de 3 ampères, le flux qui traverse chaque spire, le flux total embrassé par cette bobine, l'inductance de celle-ci.

Réponses : $26{,}5 \times 10^{-6}$ Wb; 2×10^{-2} Wb; 6,6 mH.

3 — Calculer approximativement l'inductance d'une bobine de 50 cm de longueur, de diamètre moyen 4 cm portant 600 spires. (Prendre la formule des bobines très longues.)

Réponse : 1,125 mH.

4 — Une bobine sans noyau a une longueur de 40 cm ; elle comporte, régulièrement réparties, N spires de façon que la longueur du fil enroulé soit 180 m. Calculer l'inductance de cette bobine.

Réponse : 8,1 mH.

5 — En supposant constante et égale à 1 600 la perméabilité relative du fer par rapport à l'air, pour des valeurs de l'induction magnétique inférieures à 10 000 Gs, calculer (pour $B < 10\,000$ Gs) l'inductance d'un bobinage sur noyau torique en fer, de section circulaire de diamètre 4 cm. Ce bobinage présente 600 spires régulièrement réparties ; la circonférence moyenne du tore mesure 50 cm.

Comparer ce résultat à la réponse du problème n° 3. Quelle est la limite supérieure du courant d'excitation pour que ce résultat reste valable ?

Quelle est la force électromotrice moyenne d'autoinduction provoquée dans ce bobinage par la disparition de ce courant maximum en 0,01 seconde, le noyau ne présentant pas de magnétisme rémanent ?

Réponses : 1,8 H ; 0,416 A ; 75 V.

6 — Calculer approximativement l'énergie électromagnétique du circuit inducteur d'un moteur bipolaire qui émet un flux de 0,006 Wb pour un enroulement total de 4 000 spires parcouru par un courant de 0,75 A.

Réponse : 9 J.

7 — **Notion d'inductance mutuelle.**

Deux bobines cylindriques B_1 et B_2, longues et sans noyau, de même longueur, comportent, sur une seule couche, $N_1 = 750$ spires et $N_2 = 500$ spires. Elles ont les inductances $L_1 = 0{,}9$ mH et $L_2 = 0{,}4$ mH. Elles sont connectées en série et parcourues par un courant de 5 A, elles peuvent glisser exactement l'une dans l'autre. Calculer l'inductance de l'ensemble dans les cas suivants :

a. axes rectangulaires, le flux émis par l'une ne traverse pratiquement pas l'autre ;
b. insérées l'une dans l'autre, même sens de rotation du courant ;
c. insérées l'une dans l'autre, sens de rotation du courant inverses pour l'une et l'autre.
d. Entre quelles valeurs le déplacement progressif d'une bobine par rapport à l'autre permet-il de faire varier l'inductance totale du système ?

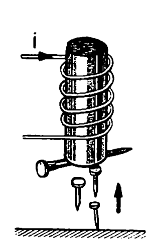
Réponses : a. *1,3 mH forme* $(L_1 + L_2)$ *;* b. *2,5 mH forme* $(L_1 + L_2 + 2M)$ *;* c. *0,1 mH forme* $(L_1 + L_2 - 2M)$ *;* d. *Variation progressive de 0,1 à 2,5 mH.*

28. — Aimantation du fer

I. — ÉLECTROAIMANT

1. — PRINCIPE

Un électroaimant est un appareil qui permet d'obtenir une force attractive sur des pièces de fer placées à proximité.



Cette force est due à l'aimantation développée dans le noyau de l'électroaimant par un bobinage inducteur.

A l'aide de ce dispositif on peut obtenir des attractions magnétiques plus importantes que celles obtenues avec des aimants permanents.

La possibilité de produire, de faire varier ou de faire cesser à volonté leur force attractive, constitue la propriété essentielle des électroaimants.

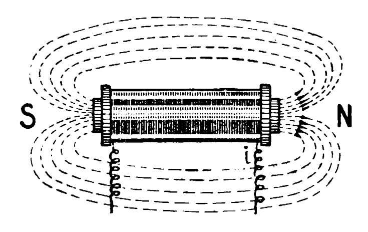
2. — CONSTITUTION

Un électroaimant comprend :

a. **un bobinage** simple ou multiple (dans ce dernier, les enroulements sont de même sens) ;

b. **un noyau magnétique** de fer ne présentant pas d'aimantation rémanente.

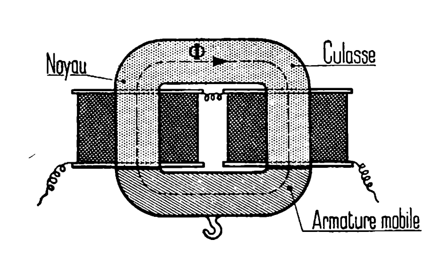
1° ***Quand le noyau est rectiligne,*** l'électroaimant joue le rôle d'un aimant droit au moment du passage du courant ; le circuit magnétique se ferme dans l'air.



2° ***Quand le noyau est en forme de U,*** le circuit magnétique se ferme dans une armature de fer mobile.

Cette armature est attirée par les extrémités du noyau, pôles nord et sud de l'électroaimant, au moment du passage du courant.

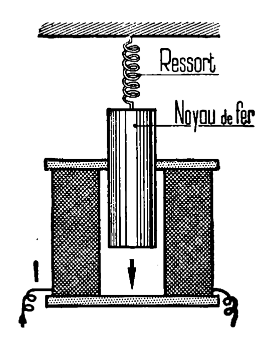
L'attraction des pôles sur l'armature tend à réduire l'entrefer ménagé entre les pôles et l'armature (règle du flux maximum).

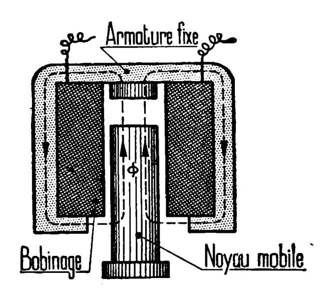


Lorsque ce dispositif est employé, l'armature mobile présente une faible course ; la force d'attraction devient très faible pour une armature éloignée, dès que l'entrefer devient important.

3° ***Circuit magnétique à noyau mobile ou électroaimant à noyau plongeur.***

Une bobine parcourue par un courant attire un noyau de fer jusqu'à ce qu'il ait pénétré à l'intérieur de cette bobine (dans la région où l'induction était maximum sans sa présence).





Un électroaimant à noyau plongeur comporte très souvent une armature de fer extérieure, élément du circuit magnétique. Le noyau mobile tend à réduire au minimum l'entrefer de ce circuit magnétique.

Ce dispositif est employé dans les appareils où l'on veut réaliser une grande course de l'armature mobile.

3. — FORCE PORTANTE D'UN ÉLECTROAIMANT

La force d'attraction d'un électroaimant sur une pièce de fer est à peu près proportionnelle au carré de l'induction magnétique $\mathcal{B}$.

Cette force dépend donc de la ***force magnétomotrice*** développée par le courant inducteur et du ***circuit magnétique***, c'est-à-dire de la position, des dimensions et de la nature de la pièce attirée.

Cette force décroît très vite, quand la réluctance du circuit magnétique augmente.

Il est possible de déterminer le maximum de cette force portante, lorsqu'une armature de fer, appliquée sur les pôles, ferme le circuit magnétique d'un électroaimant en U :

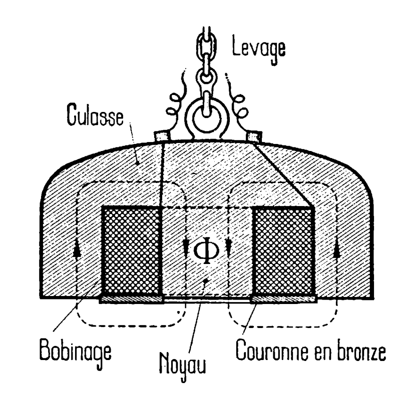
$$F = 2 \times \frac{10^7 \mathcal{B}^2 s}{8 \pi}, \text{ (1)}$$

F en newtons (force portante pour l'ensemble des deux pôles),

$\mathcal{B}$, induction magnétique en webers par mètre carré,

s, section d'un pôle en mètres carrés.

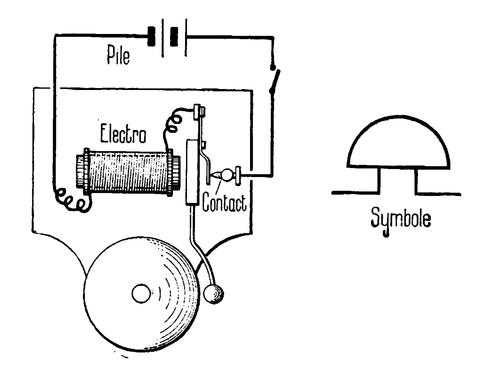
4. — APPLICATIONS



a. **Électroaimant porteur,** utilisé pour le tri et le déchargement des ferrailles.

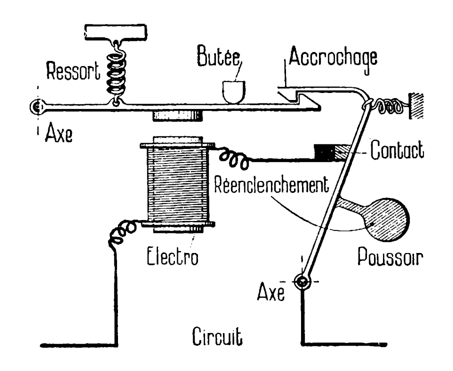
b. **Plateau magnétique ;** il permet de maintenir en place des pièces délicates ou de petite dimension, sans pince ni étau.

c. **Électroaimant de sonnerie ;** il assure la manœuvre d'un marteau trembleur, qui frappe sur un timbre signaleur et interrompt périodiquement le circuit ; le rappel du marteau et la fermeture du circuit sont assurés par l'élasticité de la tige du marteau.



(1) Cette formule s'écrit aussi

$$F = 2 \times \frac{\mathcal{B}^2 s}{8 \pi}$$ F dynes, $\mathcal{B}$ gauss, s centimètres carrés.



d. **Appareils de commande à distance :** contacteurs, appareils de signalisation.

e. **Appareils automatiques de sécurité :** disjoncteurs.

Un électroaimant commande l'ouverture d'un circuit dans certaines conditions : disjoncteurs à maximum (figure ci-contre) ou à minimum de courant ou de tension.

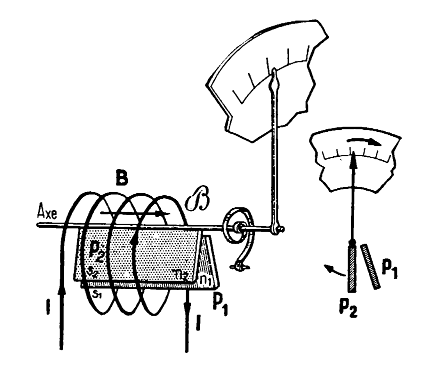
II. — AMPÈREMÈTRES ET VOLTMÈTRES A FER DOUX

Ces appareils de mesures utilisent l'aimantation du fer par influence dans le champ magnétique d'une bobine B parcourue par un courant I.

Parmi les diverses réalisations, on peut distinguer :

I. — APPAREILS A PALETTES RÉPULSIVES

Deux palettes de fer doux, planes, rectangulaires, l'une P_1 fixe, l'autre P_2 mobile, sont placées parallèlement aux lignes de flux dans la partie centrale de la bobine B.



Ces palettes s'aimantent par influence et présentent à leurs extrémités en regard des pôles de même nom, quel que soit le sens de l'induction magnétique.

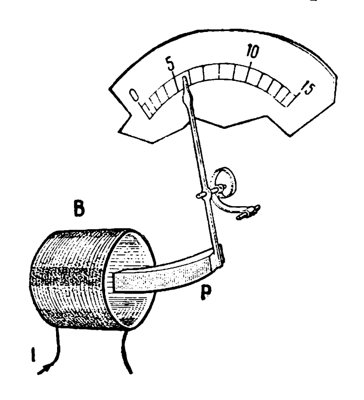
Les actions répulsives de ces pôles produisent le couple moteur agissant sur la palette mobile P_2 ; ce couple est fonction de l'induction magnétique $\mathcal{B}$ dans le fer, c'est-à-dire du courant I.

La palette P_2 entraîne une aiguille mobile en face d'un cadran gradué soit en ampères, soit en volts (dans ce dernier cas, une très grande résistance est mise en série avec la bobine B).

Un ressort spiral produit le couple de rappel.

2. — APPAREILS A AVALEMENT

Ils fonctionnent sur le même principe que les électroaimants à noyau plongeur.



Une palette mobile P est attirée vers la partie centrale de la bobine B quand celle-ci est parcourue par le courant I.

Cette palette entraîne une aiguille, mobile en face d'un cadran gradué en ampères ou en volts.

Le couple de rappel est produit par un ressort spiral.

3. — PROPRIÉTÉS

Les appareils électromagnétiques à fer doux sont robustes, de construction peu coûteuse, mais ils sont assez peu sensibles.

Les graduations du cadran ne sont pas équidistantes ; elles sont plus serrées à l'origine et à la fin du cadran. (Le couple moteur varie d'abord sensiblement, comme I^2, puis la saturation magnétique du fer se fait sentir.)

On emploie souvent ces appareils pour équiper des tableaux de distribution.

Pour ces appareils, le sens de la déviation de l'aiguille est indépendant du sens du courant I qui parcourt la bobine B.

EXERCICES

1 — Dans le noyau de fer doux d'un électroaimant, l'induction magnétique est pratiquement constante et voisine de 1 Wb/m². Calculer, dans ces conditions, la force portante par centimètre carré de surface de pôle.

Réponse : 39,8 N environ 4 kgp.

2 — La mesure du flux émis par un aimant droit de section rectangulaire 30 mm × 20 mm a donné 48×10^{-6} Wb. En supposant qu'une pièce de fer plate appliquée sur un pôle ne modifie pas sensiblement ce flux, calculer la force attractive du pôle sur cette pièce.

Réponse : 1,53 N environ 156 gp.

3 — Faire le schéma d'un disjoncteur à minimum de courant (ou de tension) utilisant un électroaimant à noyau plongeur où le noyau mobile est rappelé par la pesanteur.

4 — Dans les noyaux d'un électroaimant en U avec armature, on réalise une induction magnétique $\mathcal{B}$ = 10 000 Gs. (On sait qu'il faut pour l'acier considéré 5 At/cm.) Ce circuit magnétique a une longueur moyenne de 40 cm, la section des noyaux est circulaire de 2 cm de diamètre. On considère l'ensemble des deux joints armature-noyau comme un entrefer de 0,5 mm. On prévoit un courant d'alimentation de 2 A ; dans ces conditions, calculer :

a. la force portante agissant sur l'armature ;

b. le nombre total des spires de l'enroulement.

Réponses : 25 kgp ; 300 spires.

5 — *Calcul approché d'un électroaimant.* Cet appareil comportera deux noyaux cylindriques réunis par une culasse droite, de section rectangulaire équivalente à celle des noyaux, l'armature aura mêmes dimensions que la culasse.
On veut obtenir une force portante de 80 kg pour un courant d'excitation de 0,5 A, l'induction d'emploi prévue est $\mathcal{B}$ = 12 000 Gs, pour laquelle la courbe d'aimantation de l'acier utilisé indique 8 At/cm.

a. Déterminer la section des noyaux, prévoir une hauteur double du diamètre, ménager entre les noyaux un intervalle de 20 mm pour le logement des bobines, faire un schéma coté du circuit magnétique.

b. Calculer le nombre de spires des deux bobines (majoration de 25 % pour les joints).

c. Pour une densité de courant admise de 3 A/mm², calculer le diamètre du fil de cuivre à utiliser.

d. L'isolant a 0,15 mm d'épaisseur ; le corps des bobines est en presspahn (cylindre et joues) de 1,5 mm d'épaisseur et elles sont de 2 mm plus courtes que les noyaux. Préciser le nombre de couches de fil par bobine.

e. Déterminer la longueur du fil utilisé et la tension à employer (résistivité du cuivre 1,6 μΩ cm²/cm).

Réponses : noyaux de 30 mm de diamètre ; 260 spires environ par bobine ; fil de 0,5 mm nu ; 4 couches sur chaque bobine ; 59 m de fil ; tension 2,4 V.



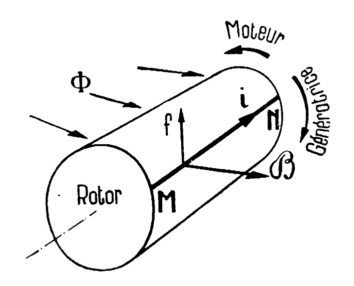
29. — Machine à courant continu

I. — PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Par rotation de conducteurs tels que MN, autour d'un axe parallèle à MN, dans un flux perpendiculaire à cet axe, les machines à courant continu peuvent :

— *transformer de l'énergie électrique en énergie mécanique, elles sont alors motrices ;*

— *transformer de l'énergie mécanique en énergie électrique, elles sont alors génératrices.*



APPLICATION DES LOIS DE L'ÉLECTROMAGNÉTISME

Le conducteur MN fait partie d'un circuit fermé ; soit i le courant dans cet élément MN qui coupe des lignes de flux.

Deux phénomènes simultanés se produisent :

a. MN *est soumis à une force électromagnétique* $f = \mathcal{B}il$ (leçon 24) ;

b. MN *est le siège d'une force électromotrice induite* $e = \mathcal{B}lv$ (leçon 25).

La machine peut donc fonctionner, selon le phénomène exploité :

a. en moteur ;

b. en générateur.

Moteur.

La force électromagnétique f constitue le phénomène utile ; f est dans le sens de la rotation.

Pour cela, une *source extérieure* doit entretenir, aux bornes du conducteur actif MN, la tension u qui maintient le courant i de sens convenable dans ce conducteur.

La force électromotrice d'induction e dans ce conducteur est alors la force contre-électromotrice du récepteur élémentaire (loi de Lenz) ; le courant i dans ce conducteur, de résistance r, est $i = \frac{u - e}{r}$.

De l'énergie électrique, fournie par la source extérieure, est transformée en énergie mécanique.

Générateur.

La force électromotrice induite e dans ce conducteur constitue le phénomène utile qui entretient le courant i.

Pour cela, un *moteur associé* entraîne le rotor et exerce un couple moteur qui se traduit, pour le conducteur MN, par une force f' opposée à la force électromagnétique f (loi de Lenz) ; dans ce cas, *la force f est résistante*, *elle s'oppose à la rotation.*

De l'énergie mécanique, fournie par le moteur associé, est transformée en énergie électrique.

II. — CONSTITUTION DE LA MACHINE

La machine comporte deux parties : l'inducteur et l'induit.

I. — L'INDUCTEUR

Système producteur du flux magnétique, l'inducteur comprend un circuit magnétique et des bobines inductrices.

a. Le circuit magnétique d'une machine bipolaire comprend :

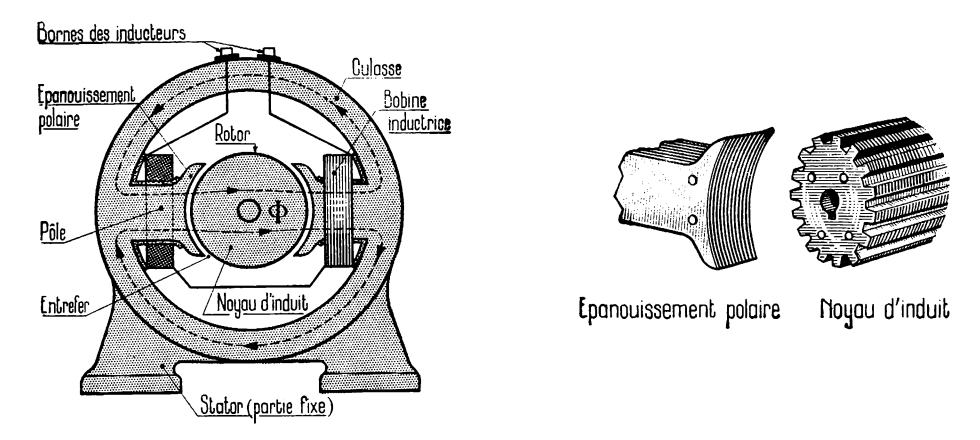
— *une culasse* en fonte ou en acier moulé ;

— *deux pôles inducteurs* en tôle douce ou en acier moulé, terminés par des épanouissements polaires en tôle feuilletée (faisant corps avec les pôles ou rapportés) ;

— *le noyau cylindrique de l'induit*, constitué par un empilage de tôles douces au silicium. Ce noyau est claveté sur l'arbre.

Des encoches ménagées dans ce noyau, suivant des génératrices du cylindre, constituent les logements des conducteurs actifs de l'induit ;

— *l'entrefer*, de quelques millimètres d'épaisseur, sépare les pôles inducteurs du noyau de l'induit.



b. **Les bobines inductrices** constituent deux enroulements en série ; elles sont calées sur les pôles, qui en constituent les noyaux.

Excitées par le courant inducteur (courant d'excitation), elles produisent une force magnétomotrice M qui entretient le flux inducteur Φ dans le circuit magnétique considéré.

Les bobines inductrices sont réalisées en *fil de cuivre isolé* au coton imprégné *de vernis isolant* ; elles sont *isolées de la carcasse* et des noyaux par plusieurs couches de ruban spécial et des feuilles de papier comprimé, fibre vulcanisée ou presspahn.

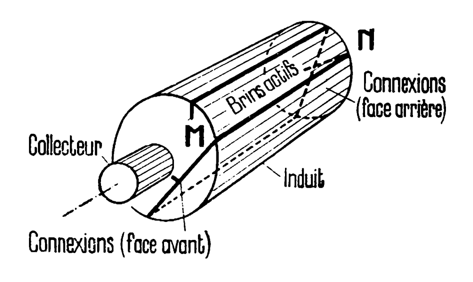
2. — L'INDUIT

L'induit est un bobinage en circuit fermé comportant :

a. **les conducteurs actifs** tels que l'élément MN, considéré au début de cette leçon, logés dans les encoches du noyau induit ;

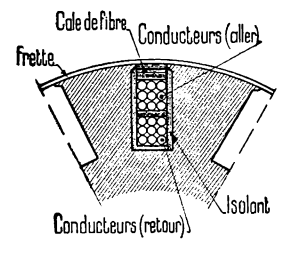
b. les connexions ou conducteurs inactifs, répartis sur les deux faces de ce noyau.

A l'arrière, les connexions réunissent deux à deux les conducteurs actifs diamétralement opposés.



A l'avant, elles réunissent ces conducteurs actifs, d'une part entre eux, deux à deux, et d'autre part aux lames du collecteur.

Conducteurs actifs et connexions sont réalisés en fil de cuivre isolé au coton imprégné de vernis isolant.

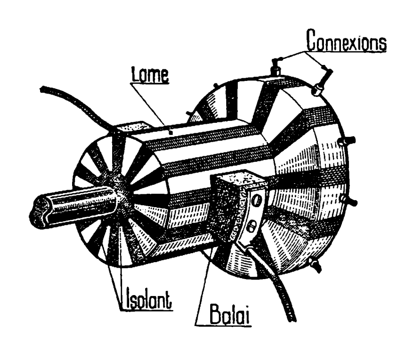


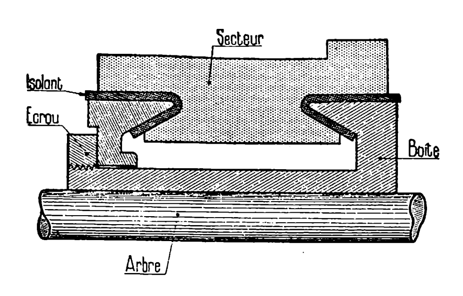
Le bobinage est isolé de la masse du noyau par des feuilles de carton isolant, presspahn, et calé par des baguettes de fibre.

Des frettes en fil d'acier maintiennent solidement le bobinage dans les encoches de l'induit pendant la rotation.

c. **Le collecteur** est un cylindre situé sur la face avant du noyau induit et calé sur le même arbre ; il fait partie du rotor.

Le collecteur est constitué de lames de cuivre, secteurs juxtaposés, isolées entre elles par des feuilles de mica, et isolées de l'arbre par des couronnes de fibre ou de micanite.



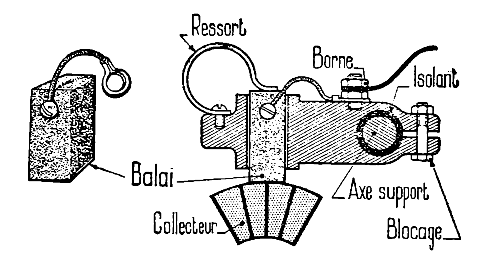


Le collecteur constitue un commutateur tournant *; par l'intermédiaire de deux frotteurs fixes, balais de charbon diamétralement opposés sur le collecteur, il assure la liaison électrique entre le bobinage induit et le circuit extérieur.*

Les connexions des conducteurs actifs sur la face avant sont respectivement soudées aux talons des lames du collecteur.

Dans le cas où la machine est motrice, la source extérieure alimente le bobinage induit par les balais et le collecteur.

Dans le cas où la machine est génératrice, le courant qu'elle débite dans le circuit extérieur passe par le collecteur et les balais.



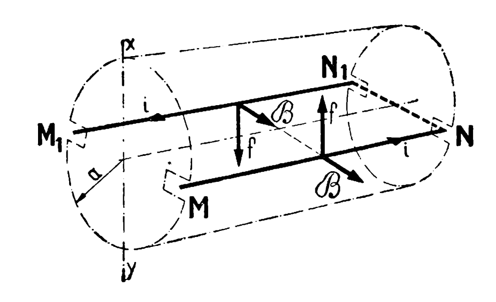
d. **Les balais** sont des blocs conducteurs en aggloméré de charbon et graphite. Ils sont diamétralement opposés (ligne neutre du collecteur) et maintenus au contact du collecteur par des ressorts de pression.

Les balais portent des connexions, câbles de cuivre souples, qui les raccordent aux bornes de prise de courant.

Les porte-balais sont fixés au stator dont ils sont isolés électriquement.

III. — RÔLE DU COLLECTEUR

Le plan de symétrie de la machine sépare deux régions, situées de part et d'autre de la ligne *xy* appelée ligne neutre de l'enroulement induit (trace du plan de symétrie sur un plan perpendiculaire à l'axe du rotor).



I. — CAS D'UNE MACHINE MOTRICE

Si le sens du courant était constant dans un conducteur tel que MN, le sens du moment de la force *f* qui sollicite l'induit changerait au passage de la ligne neutre. (Cette force passe d'un côté à l'autre du plan de symétrie.)

(Appliquez la règle donnant le sens de la force *f* pour ce conducteur situé dans chacune des deux régions.)

C'est le rôle du collecteur, organe d'alimentation de l'induit, d'inverser le sens du courant dans ce conducteur, quand celui-ci traverse la ligne neutre.

Le moment de la force *f* par rapport à l'axe garde alors un sens constant.

2. — CAS D'UNE MACHINE GÉNÉRATRICE

Pour un sens de rotation donné, la force électromotrice d'induction e, qui prend naissance dans un conducteur actif coupant le flux Φ, inverse sa polarité au passage de la ligne neutre. Le courant qui en résulte change de sens à ce moment.

C'est le rôle du collecteur de maintenir une polarité constante aux bornes du circuit extérieur.

Remarque.

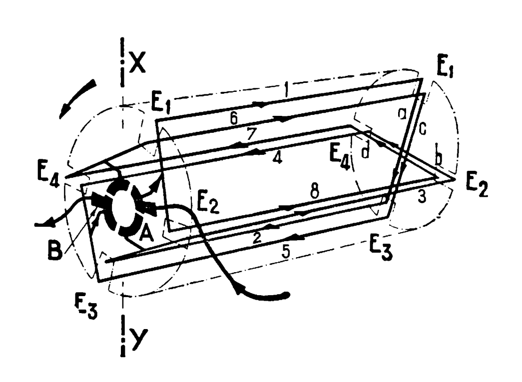
Pour un conducteur situé au voisinage de la ligne neutre, la force électromagnétique f est faible ; sa direction est sensiblement radiale ; son moment, par rapport à l'axe, est pratiquement nul.

D'autre part, pour ce conducteur, la direction de l'induction magnétique $\mathcal{B}$ est sensiblement parallèle au déplacement du conducteur, la force électromotrice induite e est très faible.

IV. — RÉALISATION D'UN BOBINAGE INDUIT

I. — EXEMPLE DE BOBINAGE SIMPLIFIÉ

Le noyau induit présente quatre encoches E_1, E_2, E_3, E_4, le collecteur est à quatre lames, le bobinage comporte deux conducteurs par encoche.



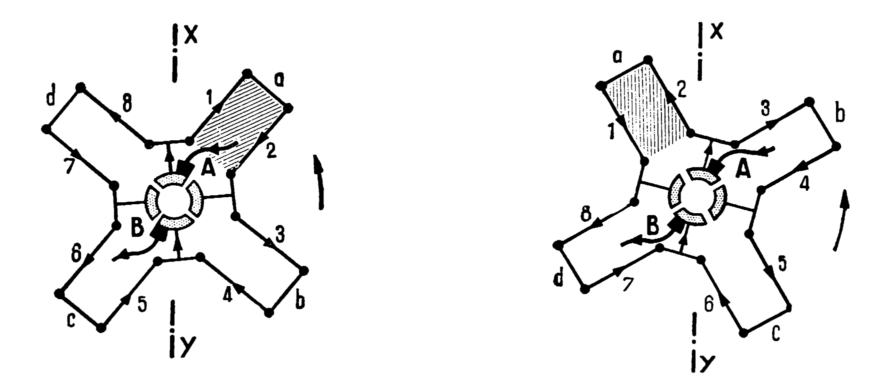
a. **Les connexions face arrière** réunissent respectivement les conducteurs 1 et 2, 3 et 4, 5 et 6, 7 et 8, constituant ainsi quatre spires incomplètes croisées *a*, *b*, *c*, *d*.

Les connexions face avant réunissent respectivement les conducteurs 3 et 2, 5 et 4, 7 et 6, 1 et 8.

Dans l'encoche E_1, le conducteur 1 constitue le conducteur aller de la spire *a*, le conducteur 6 est le conducteur retour de la spire *c*.

b. **Les connexions avant**, d'une part, mettent en série les spires *a*, *b*, *c*, *d*, constituant ainsi un bobinage fermé ; d'autre part, elles réunissent respectivement quatre points équidistants du bobinage aux quatre lames successives du collecteur. On pourrait schématiser très simplement ce circuit électrique (sans tenir compte des croisements).

Entre les balais A et B, les deux moitiés du bobinage sont en dérivation.



Le courant I est amené à l'induit si la machine est motrice, ou est débité par l'induit si la machine est génératrice, chaque conducteur est parcouru par le courant $\frac{I}{2}$.

Une rotation de l'induit, qui fait passer les balais du contact avec les lames 8.1 et 4.5 du collecteur, au contact avec les lames 2.3 et 6.7, correspond à une inversion du sens du courant dans les conducteurs 1 et 2 (spire *a*) et 5 et 6 (spire *c*) sans modifier la polarité des balais (par exemple, arrivée du courant I à l'induit par le balai A, départ de ce courant par le balai B).

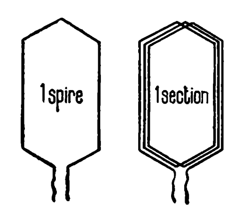
Cette rotation correspond précisément au passage des conducteurs des spires *a* et *c* d'un côté à l'autre de la ligne neutre *xy*.

2. — GÉNÉRALISATION

Dans la pratique, on augmente et on régularise soit le couple moteur dans le cas de la machine réceptrice, soit la force électromotrice induite dans le cas de la machine génératrice :



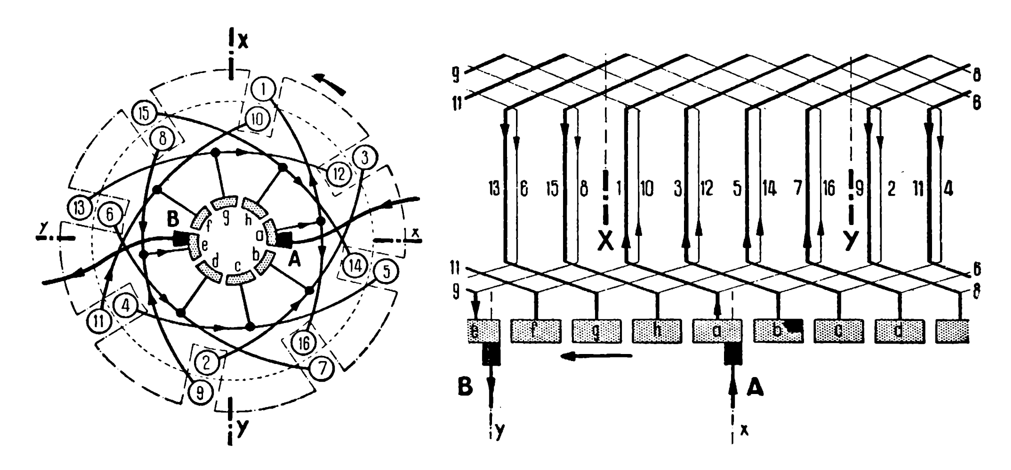
a. par multiplication du nombre des encoches ;



b. par multiplication du nombre des conducteurs dans ces encoches.

n spires en série dans une même paire d'encoches constituent une section. Ceci a pour effet de rendre *n* fois plus grand, que pour une seule spire par paire d'encoches (cas envisagé dans l'étude précédente), soit le couple moteur (machine réceptrice), soit la force électromotrice induite (machine génératrice).

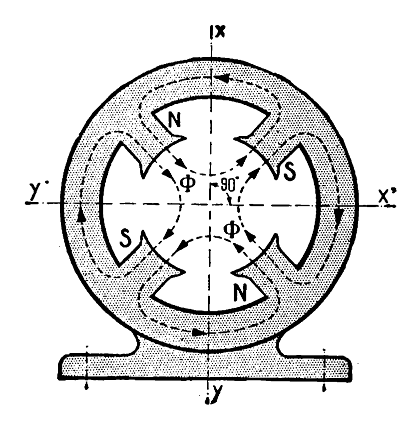
Le passage d'un conducteur à la ligne neutre correspond, pour lui, à un point mort. Pour un grand nombre d'encoches, le nombre des conducteurs au point mort est faible devant leur nombre total, et il y a toujours sensiblement le même nombre de conducteurs au voisinage immédiat de la ligne neutre.



Un enroulement tel que celui que nous avons étudié comporte 2 K (nombre pair) encoches sur le noyau induit ; il y a 2 K lames au collecteur.

3. — REMARQUE

Machines multipolaires.



Il existe des machines comportant plusieurs paires de pôles inducteurs, elles sont plus économiques aux grandes puissances.

Dans le cas où les inducteurs présentent quatre pôles (deux pôles nord et deux pôles sud), la machine est tétrapolaire.

La répartition des flux est telle que cette machine présente deux lignes neutres décalées de 90°.

Un conducteur actif de l'induit coupe le flux Φ émis par un pôle N pour une rotation de $\frac{1}{4}$ de tour (au lieu de $\frac{1}{2}$ tour dans le cas de la machine bipolaire).



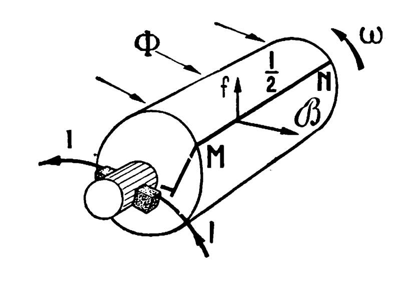
30. — Moteur bipolaire

I. — GÉNÉRALITÉS. DÉFINITIONS

I. — PUISSANCE MÉCANIQUE

Les enroulements inducteurs excités par un courant constant i produisent le flux constant Φ ; l'induit est alimenté aux balais par le courant I.

Le flux inducteur exerce sur les conducteurs de l'induit, tels que MN, des forces f dont le moment résultant par rapport à l'axe de rotation constitue le *couple moteur de la machine réceptrice.*



Pour un couple résistant donné, le moteur tourne et prend une vitesse de régime.

Chaque conducteur parcouru par le courant $\frac{I}{2}$ coupe deux fois le flux Φ pour *une rotation de un tour du rotor.*

A la vitesse de n tours par seconde, pour N conducteurs actifs, le flux total coupé en 1 seconde est $\Phi_t = 2\ \Phi\ \mathrm{N}n$.

Le travail des forces électromagnétiques en 1 seconde est donc :

$$W = \frac{I}{2} \times \Phi \quad (\text{leçon 24}: \quad W = I\ \Delta\Phi),$$

c'est la *mesure de la puissance mécanique* P mise en jeu par ces forces

$$\boxed{\mathbf{P = N}n\,\mathbf{\Phi I}} \quad (1)$$

P watts, Φ webers.
I amperes.

Remarque.

La puissance mécanique de la machine, ou puissance réelle disponible sur l'arbre, est égale à la puissance mise en jeu par les forces électromagnétiques $P = \mathrm{N}n\ \Phi I$, diminuée des *pertes de puissance dues aux divers frottements* :

a. électriques, par courants de Foucault dans le noyau d'induit ;

b. magnétiques, par hystérésis dans le même noyau ;

c. mécaniques, aux paliers et par résistance de l'air.

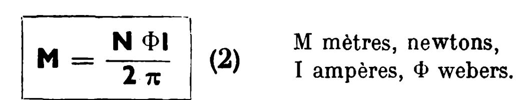
En première approximation, si l'on néglige ces différentes pertes, la puissance mécanique de la machine réceptrice est $P = Nn\,\Phi I$.

2. — COUPLE MOTEUR

La puissance mécanique dans un mouvement de rotation s'exprime par $P = M\omega$ (leçon 2), relation dans laquelle M est le moment du couple moteur, ω la vitesse angulaire, $\omega = 2\,\pi n$;

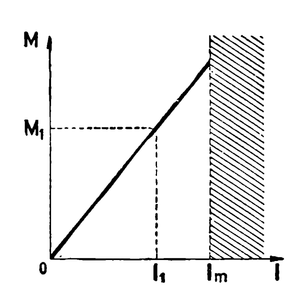
d'où
$$P = Nn\,\Phi I = M \times 2\,\pi n$$

Pour la machine réceptrice bipolaire :



$$\boxed{M = \frac{N\,\Phi I}{2\,\pi}} \quad (2)$$

M mètres, newtons,
I ampères, Φ webers.



Pour un flux inducteur Φ constant, c'est-à-dire pour une excitation constante, le couple moteur est proportionnel au courant I *absorbé par l'induit.*

La courbe représentative du moment M en fonction du courant I est une droite.

3. — FORCE CONTRE-ÉLECTROMOTRICE

En appliquant à ce moteur la relation générale des récepteurs (leçon 12), $E' = \frac{P}{I}$ ou P est la puissance transformée sous forme non thermique, la force contre-électromotrice de ce récepteur est donnée par $E' = \frac{Nn\ \Phi I,}{I}$

$$\boxed{E' = Nn\,\Phi} \quad (3)$$

E' volts,
Φ webers.

Si l'on désigne par *r* la résistance électrique de l'induit, mesurée entre balais, la tension U d'alimentation (aux bornes des balais) est donnée par la loi d'Ohm :

$$U = E' + rI$$

Remarques.

a. Dans le bobinage considéré, les deux moitiés du circuit induit sont en dérivation entre les deux balais ; si r_0 est la résistance de tout le fil du bobinage induit, chaque moitié a une résistance $\frac{r_0}{2}$, et la résistance de l'induit (les deux moitiés en parallèle) a pour valeur $\frac{r_0}{4}$.

La résistance r comporte, en outre, la résistance des balais et des contacts balais-collecteur.

b. La résistance r *de l'induit est aussi faible que possible ;* en général la chute de tension $u = r\text{I}$, dans l'induit, est faible devant la force contre-électromotrice E′.

Les valeurs de U et de E′ sont assez voisines, et le couple moteur peut être pratiquement mesuré par le quotient

$$\text{M} = \frac{\text{UI}}{\omega} = \frac{\text{Puissance électrique fournie par le réseau}}{\text{Vitesse angulaire}}.$$

Les grandeurs qui interviennent dans cette expression sont susceptibles de mesures directes.

c. L'enroulement induit est parcouru par le courant $\frac{\text{I}}{2}$, dans chaque conducteur, ***ce bobinage produit une force magnétomotrice qui modifie l'action des inducteurs.***

Il en résulte une réduction du flux inducteur et une perturbation dans sa répartition dans l'entrefer ; ce phénomène porte le nom de *réaction d'induit* ; il dépend du régime de fonctionnement.

Des dispositifs compensateurs, bobinages en série avec l'induit, parcourus par le courant I, réduisent considérablement la perturbation causée par la réaction d'induit.

Exemple.

Un induit de 560 conducteurs actifs, tourne à la vitesse de 1 200 t/mn, dans un flux de 0,01 Wb, et absorbe 20 A. La résistance de cet induit est 0,7 Ω.

La puissance mécanique totale est

$$\text{P} = \text{N}n\,\Phi\text{I} = 560 \times \frac{1200}{60} \times 0{,}01 \times 20 = 2\,240 \text{ W}$$

Le moment du couple moteur total,

$$\text{M} = \frac{\text{N}\ \Phi\text{I}}{2\pi} = \frac{560 \times 0{,}01 \times 20}{2\pi} = 17{,}8\ m\,.\,\text{N}$$

La force électromotrice.

$$\text{E}' = \text{N}n\,\Phi = 560 \times \frac{1\,200}{60} \times 0{,}01 = 112 \text{ V}$$

La tension aux bornes,

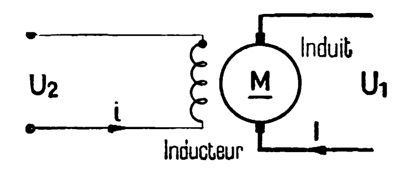
$$\text{U} = \text{E}' + r\text{I} = 112 + 0{,}7 \times 20 = 126 \text{ V}$$

La puissance électrique fournie à l'induit,

$$\text{P}_1 = \text{UI} = 126 \times 20 = 2\,520 \text{ W}$$

II. — MOTEUR A EXCITATION SÉPARÉE

Le circuit d'excitation, celui des bobines inductrices, est ici indépendant du circuit induit ; l'un et l'autre peuvent être alimentés par des sources différentes.



1. — SENS DE ROTATION

L'étude de la force électromagnétique $f = \mathcal{B}Il$ montre que l'on peut *inverser* le sens du couple moteur, c'est-à-dire le sens de rotation du moteur :

— *soit* en inversant le sens du flux Φ, c'est-à-dire *en inversant le sens du courant inducteur ;*

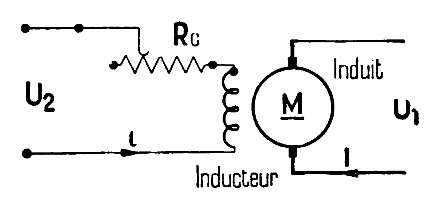
— *soit* en inversant le sens du courant dans chaque conducteur actif, c'est-à-dire *en inversant le sens du courant I alimentant l'induit.*

2. — RÉGLAGE DE LA VITESSE

La relation $E' = Nn\Phi$ peut s'écrire $n = \frac{E'}{N\Phi} = \frac{U - Ir}{N\Phi}$

la chute de tension Ir est faible devant la tension U aux bornes de l'induit; d'autre part le nombre N des conducteurs actifs de l'induit est constant.

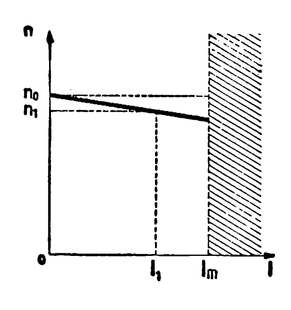
a. **Si le moteur est alimenté sous tension U constante** (cas général), la vitesse de rotation n est inversement proportionnelle au flux inducteur Φ.



Le réglage de la vitesse peut s'effectuer à l'aide d'un *rhéostat d'excitation* ou *rhéostat de champ*, Rc, en série avec les bobines inductrices.

Pour un circuit magnétique non saturé (leçon 23), le flux inducteur est sensiblement proportionnel au courant d'excitation i.

A tension d'alimentation constante U, ***si le flux inducteur*** Φ ***est constant, la vitesse est sensiblement constante.***



La vitesse décroît cependant légèrement quand le couple résistant augmente ; dans ce cas, le courant absorbé I augmente, ainsi que le terme rI.

La courbe ci-contre représente cette variation de la vitesse.

b. **Si la tension U est réglable**, pour un flux inducteur Φ constant, *la vitesse n est proportionnelle à la tension* U aux bornes de l'induit (pour des valeurs faibles du terme Ir).

3. — CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT SOUS TENSION CONSTANTE

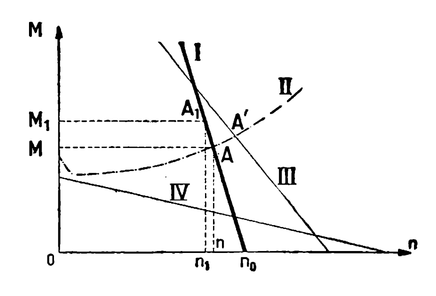
A flux inducteur constant, en charge, c'est-à-dire lorsque le moteur fournit un travail mécanique, les conditions de fonctionnement : courant absorbé, vitesse, couple, puissance, dépendent de la machine utilisatrice associée.

A partir des courbes représentant les variations de la vitesse *n* et du couple moteur M, en fonction du courant absorbé I, *il est possible de tracer par points :*

la caractéristique mécanique du moteur ; c'est la courbe des variations du moment du couple moteur M en fonction de la vitesse *n* (courbe I).

Pour une valeur I_1 du courant, on obtient sur la courbe de la vitesse une valeur n_1, et, par suite, sur la courbe du couple une valeur M_1 ; ces valeurs n_1 et M_1 déterminent un point A_1 de la caractéristique mécanique.

Pour une utilisation donnée, machine accouplée au moteur (pompe, machine-outil...), le couple résistant en fonction de la vitesse de rotation *n* est représenté par une courbe dont la forme générale peut être celle de la courbe II.



L'intersection de ces deux courbes I et II fournit le *point de fonctionnement A.*

Cette intersection détermine la vitesse n *pour laquelle le couple moteur est égal au couple résistant, c'est-à-dire la vitesse de régime normal du moteur lorsqu'il est accouplé à cette machine.*

Ces valeurs *n* et M entraînent la connaissance du courant absorbé, de la puissance développée et de la puissance électrique demandée au réseau.

Remarques.

Une variation du courant d'excitation entraîne une variation de la vitesse $n = \frac{U - Ir}{N \Phi}$.

Par exemple, pour augmenter la vitesse on diminue le flux de la valeur Φ à la valeur Φ' par la manœuvre du rhéostat d'excitation.

Pour cette valeur Φ' du flux, on a une nouvelle caractéristique mécanique telle que la courbe III et un nouveau point de fonctionnement A' à vitesse plus élevée.

Cependant ce réglage est limité :

a. *Pour une valeur trop faible du flux* telle que Φ'', correspondant à la caractéristique mécanique courbe IV qui ne présente aucune intersection avec la courbe du couple résistant, il n'y a aucun point de fonctionnement.

Le couple résistant reste supérieur au couple moteur, le moteur cale. S'il est en marche, la vitesse décroît et s'annule, ainsi que la force contre-électromotrice.

Le courant absorbé I devient très important $\left(I = \frac{U - E'}{r}\right)$, il y a danger de détérioration du moteur par effet thermique.

b. *Par contre, si le couple résistant est faible*, dans le cas, par exemple, du moteur non accouplé, pour un flux très faible la vitesse $n = \frac{U - Ir}{N \Phi}$ peut devenir très grande.

Le moteur s'emballe, et le bobinage induit peut se disloquer sous l'effet de la force centrifuge.

Des dispositifs de sécurité sont souvent prévus en cas de rupture accidentelle du circuit inducteur. (Pour un courant inducteur i nul, le flux est réduit au flux rémanent des inducteurs.)

Pour cette raison, les rhéostats d'excitation ne comportent pas de plot mort.

De même, pour arrêter le moteur, il faut d'abord couper le circuit induit (il est bon de le décharger quand cela est possible), ensuite on coupera le circuit inducteur.

4. — RHÉOSTAT DE DÉMARRAGE

L'étude précédente suppose le moteur en rotation, en régime permanent établi.

Pendant la période de démarrage, les conditions électriques et mécaniques sont variables.

a. Conditions électriques.

La force électromotrice $E' = Nn\,\Phi$ dépend de la vitesse de rotation n.

Pour une tension U aux bornes de l'induit, le courant absorbé est :

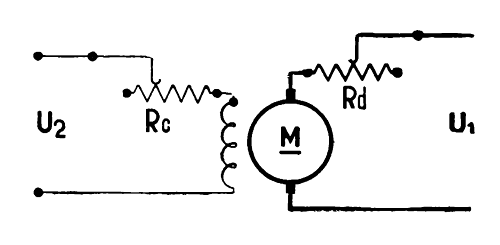
$$I = \frac{U - E'}{r}.$$

Au début du démarrage, la vitesse est nulle, ainsi que la force contre-électromotrice.

Si on appliquait directement la tension U du secteur d'alimentation (celle qui correspond au régime normal), le courant absorbé par l'induit $I = \frac{U}{r}$ serait très grand, ainsi que l'effet thermique rI^2 ou $\frac{U^2}{r}$, puisque la résistance de l'induit est faible.

Dans l'exemple déjà considéré où $U = 126$ V et $r = 0{,}7\ \Omega$, on aurait $I = \frac{126}{0{,}7} = 180$ A, courant 9 fois plus grand que celui de régime normal (20 A), pour lequel est construit ce moteur, le bobinage induit serait détruit par l'effet thermique.

Pour éviter cette détérioration, on intercale en série entre la source qui maintient la tension U et l'induit un *rhéostat de démarrage* R*d*.



Les constructeurs ont prévu pour le bobinage induit une marge de sécurité qui permet à ce bobinage de supporter, pendant un temps assez court (quelques secondes par exemple), un courant de démarrage I_d supérieur au courant I de régime normal.

Dans la pratique, ce courant I_d admissible peut atteindre 1,5 à 2 fois la valeur du courant I.

La résistance totale X du rhéostat de démarrage est définie par l'expression

$$I_d = \frac{U}{r + X}$$

Dans l'exemple précédent, si on admet $I_d = 1{,}5$ I, c'est-à-dire $I_d = 1{,}5 \times 20 = 30$ A, on a $30 = \frac{126}{0{,}7 + X}$, d'où $X = 3{,}5\ \Omega$.

Pendant la période de démarrage, la manœuvre du rhéostat entraîne la variation (de X à 0) de sa résistance x. Elle ***doit être progressive***, au fur et à mesure que la vitesse du moteur croît de 0 à sa valeur de régime normal (n tours par seconde).

Le courant absorbé est, en effet,

$$I' = \frac{U - E'}{r + x}.$$

Lorsque la vitesse croît, la force contre-électromotrice E' croît, le courant absorbé décroît, ainsi que le couple moteur, jusqu'à une vitesse d'équilibre $n' < n$.

Plot par plot on obtient progressivement la vitesse n de régime normal pour laquelle $x = 0$, le rhéostat de démarrage est alors hors circuit.

b. **Conditions mécaniques.**

En période de régime normal, le couple moteur doit vaincre le couple des résistances de frottement et le couple résistant des machines mécaniques qu'il entraîne.

En période de démarrage, ce couple moteur doit, en outre, fournir l'énergie cinétique des masses en rotation, soit $W = \frac{1}{2} J \omega^2$.

ω est la vitesse angulaire, J est le moment d'inertie de toutes les masses en rotation (induit et organes mécaniques auquel il est accouplé).

Cette énergie cinétique ne peut être fournie instantanément (la source fournit cette énergie sous la forme $W = UIt$ et le courant est limité).

5. — EMPLOI DU MOTEUR A EXCITATION SÉPARÉE

L'indépendance totale des circuits inducteur et induit permet d'adapter ce moteur à toutes les conditions. On dispose d'une grande marge de réglage pour la tension appliquée à l'induit et la tension appliquée aux inducteurs, ce qui assure un fonctionnement précis et sûr.

Un tel moteur peut être employé pour la commande de broches de machine-outil, l'entraînement de treuils de mine, ou comme *servo-moteur de commande de machines automatiques.*

Pour les moteurs de grande puissance (1 000 kW), il est nécessaire, pour réduire le courant dans l'induit (et, par suite, la section des bobinages et les dimensions du collecteur), d'appliquer à l'induit une tension de 500 à 1 500 V ; par contre, il est plus commode d'employer pour l'alimentation des inducteurs une tension plus faible (110-220 V).

L'inconvénient majeur de ce type de moteur est l'utilisation de deux sources d'alimentation. D'autres dispositifs répondant à des problèmes bien définis seront étudiés au chapitre suivant.

EXERCICE

1 — Une machine à courant continu à excitation indépendante a donné aux essais les résultats suivants : résistance de l'induit 0,8 Ω, force électromotrice en générateur à vide, à la vitesse de 1 500 t/mn pour diverses valeurs du courant d'excitation : E = 75 V, 103 V, 115 V, 123 V ; pour i = 0,5 A, 0,75 A, 1 A, 1,25 A.

On fait fonctionner cette machine en moteur, accouplé à une machine-outil, sous la tension 120 V, l'induit absorbe 20 A et tourne à la vitesse de 1 400 t/mn. On demande :

a. le couple total développé et l'intensité du courant d'excitation dans ces conditions.

b. Calculer le courant I absorbé par l'induit et le courant d'excitation i pour une vitesse de rotation de 1 800 t/mn, en supposant constant le couple résistant de la machine entraînée. (La vitesse de 1 800 t/mn est obtenue par réglage de l'excitation.)

(On ne tiendra compte que des pertes par effet Joule dans l'induit.) (C. A. P.)

Réponses :* *14,2 m.N ; 0,94 A ; 27,3 A ; 0,56 A.

31. — Moteurs bipolaires

I. — MOTEUR EXCITÉ EN DÉRIVATION

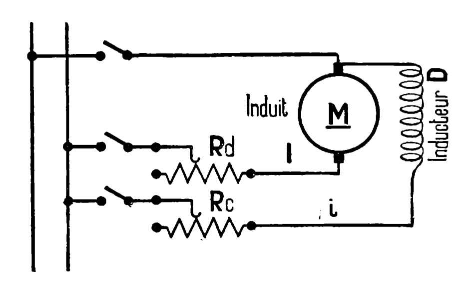
I. — MONTAGE

Dans tous les cas, *induit et inducteurs D sont alimentés*, *en dérivation*, par la même source, *sous tension constante.* On l'appelle encore moteur shunt.

Les bobines inductrices comportent un grand nombre de tours de fil assez fin par rapport à celui de l'induit.

a. Montage direct.

L'induit avec son rhéostat de démarrage R*d* et l'inducteur avec son rhéostat de champ R*c* (réglage de la vitesse) sont reliés, en dérivation, aux bornes de la source. Ce montage présente des inconvénients.



Au démarrage, R*d doit présenter le maximum de résistance* pour protéger l'induit de résistance faible ; *le rhéostat* R*c doit présenter le minimum de résistance* pour que le flux ait une valeur importante. Il faut, en effet, un couple moteur suffisant pour une faible valeur du courant induit.

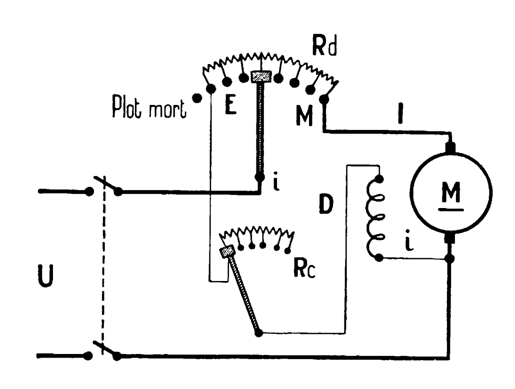
Le courant induit ne doit jamais être établi avant le courant inducteur et, pour éviter l'emballement du moteur, il doit être coupé avant le courant inducteur.

D'autre part, *le phénomène d'autoinduction* est très important à la coupure du circuit, très inductif, des inducteurs.

b. Montage industriel.

Le montage anti-inductif, utilisé couramment, évite ces inconvénients.

Le circuit des inducteurs reste toujours fermé sur la résistance totale du rhéostat de démarrage R*d*, en série avec l'induit.



De ce fait :

— l'alimentation de l'induit et des inducteurs est simultanée ;

— l'effet d'autoinduction est considérablement diminué à la coupure du courant.

Remarque.

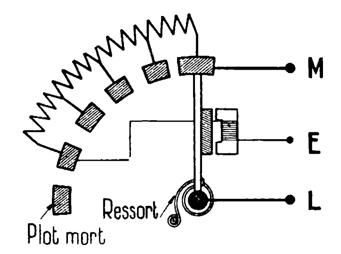
a. **La mise en route** se fait par passage de la manette du **rhéostat de démarrage** R*d* du plot mort aux plots successifs, à mesure que la vitesse croît. La résistance du circuit induit diminue ainsi, progressivement, à mesure que la force contre-électromotrice croît.

Pendant la manœuvre, la résistance de R*d* (quelques ohms, en général) est introduite progressivement dans le circuit inducteur, très résistant. La variation relative de résistance de ce circuit est faible.

b. **La manœuvre inverse du rhéostat R*d*** jusqu'au plot mort entraîne l'arrêt du moteur ; elle maintient le courant inducteur, donc le flux, jusqu'à l'arrêt du courant dans l'induit.

c. **Le rhéostat de démarrage R*d*** est souvent muni d'un **disjoncteur électromagnétique à minimum**.

Si le courant inducteur devient trop faible, la manette est rappelée jusqu'au plot mort par un ressort et le moteur est mis hors circuit.



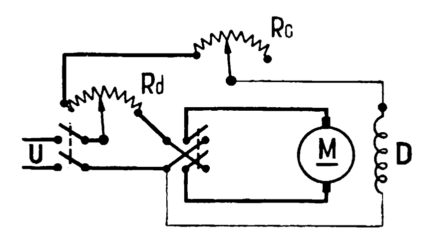
En cas d'arrêt accidentel de la tension du réseau, le disjoncteur fonctionne ; à la reprise de la tension du réseau, le moteur arrêté ne risque pas d'être alimenté sans rhéostat de démarrage. Ce disjoncteur à minimum de courant est en série sur le circuit inducteur

d. **Un rhéostat de champ** peut, en outre, être monté en série sur l'excitation.

Par augmentation de sa résistance utile on obtient une diminution du flux inducteur et, par suite, une accélération du moteur. Ce réglage permet des variations de la vitesse de l'ordre de 10 %.

2 — SENS DE MARCHE

L'inversion du sens de marche peut être obtenue par la manœuvre d'un inverseur, monté soit sur le circuit inducteur, soit sur le circuit induit.



La manœuvre de cet inverseur ne doit se faire qu'à l'arrêt.

(L'inversion du sens du courant à la prise d'alimentation générale ne modifierait pas le sens de rotation ; courant induit et flux seraient simultanément changés de sens.)

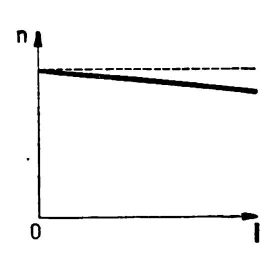
3. — ALIMENTATION SOUS TENSION CONSTANTE

Les caractéristiques sont pratiquement les mêmes que celles du moteur à excitation séparée.

a. **Vitesse** $n = \dfrac{U - Ir}{N\,\Phi}$

— ***A vide***, c'est-à-dire sans couple résistant (moteur débrayé par exemple), la vitesse est stable et bien définie.

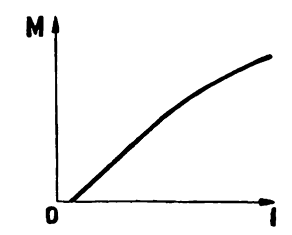
Le courant inducteur n'est jamais nul (le rhéostat de champ ne peut lui faire subir que de faibles variations), le flux garde une valeur notable et le moteur ne peut s'emballer.



— ***En charge***, le moteur étant accouplé à une machine qui oppose un couple résistant, la vitesse est sensiblement constante, pour une position donnée de la manette du rhéostat de champ.

Cette vitesse décroît légèrement quand le courant I augmente (c'est-à-dire la puissance demandée au réseau) ; une modification du réglage du rhéostat de champ permet d'y remédier.

b. **Couple moteur** $M = \dfrac{NI\,\Phi}{2\pi}.$



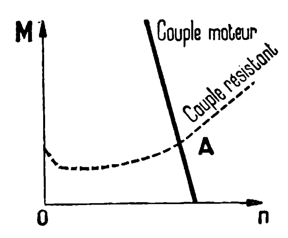
A excitation constante, le couple moteur est proportionnel au courant absorbé I, pour des valeurs faibles de ce courant.

Pour des valeurs importantes du courant I, le couple croît moins vite à cause de la réaction d'induit qui diminue le flux inducteur Φ.

c. Caractéristique mécanique.

La courbe du couple moteur en fonction de la vitesse résulte des deux courbes précédentes.

Elle permet de déterminer le point de fonctionnement A du moteur accouplé à une machine dont on connaît la variation du couple résistant en fonction de la vitesse.



Puisque la vitesse du moteur shunt est sensiblement constante, la puissance absorbée croît proportionnellement au couple résistant ($P = M\omega$).

4. — EMPLOI DU MOTEUR SHUNT

Le moteur shunt est très employé à cause de sa faible variation de vitesse.

C'est surtout le moteur des machines-outils, pour lesquelles il est nécessaire que la vitesse varie peu, quelle que soit la charge, par exemple : moteurs de tours, fraiseuses...

5. — BILAN DES PUISSANCES DANS UN MOTEUR SHUNT

Puissance fournie par la ligne : $\mathbf{P = U(I + i)}$ →

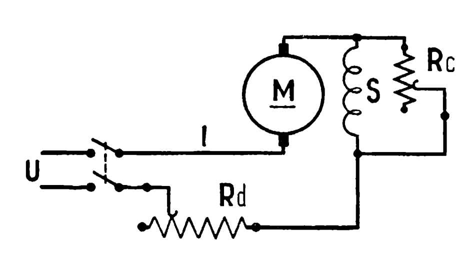
- Effet Joule dans l'induit, de résistance r :
  $p_1 = rI^2$.
- Effet Joule dans les inducteurs et le rhéostat de champ, de résistance r' :
  $p_2 = r'i^2 = Ui$.
- Puissance transformée dans l'induit en puissance mécanique :
  $P' = E'I = M\omega$ →
  (E′ force contre-électromotrice).
  - p_3 perdue par frottements divers :
    - *a.* mécaniques, aux paliers et résistance de l'air ;
    - *b.* magnétiques, hystérésis ;
    - *c.* électriques, courants de Foucault.
  - $P_1 = M\omega - p_3$, puissance mécanique disponible sur l'arbre.

Rendement du moteur : $\eta = \dfrac{P_1}{P}$.

II. — MOTEUR SÉRIE SOUS TENSION CONSTANTE

1. — MONTAGE

Les bobines inductrices sont constituées par un petit nombre de spires d'un conducteur assez gros pour supporter tout le courant I qui passe dans l'induit.



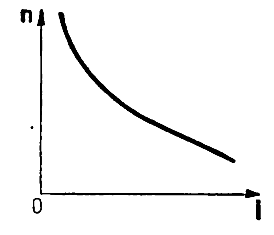
L'enroulement inducteur est en série avec l'induit, un rhéostat de champ R*c* peut être monté en dérivation à ses bornes.

Le moteur est alimenté par l'intermédiaire d'un rhéostat de démarrage R*d*.

Le changement de sens de marche est obtenu par inversion du courant, soit dans l'induit, soit dans l'inducteur.

2. — PROPRIÉTÉS DU MOTEUR SÉRIE

a. **Vitesse** $n = \dfrac{U - Ir}{N\,\Phi}$

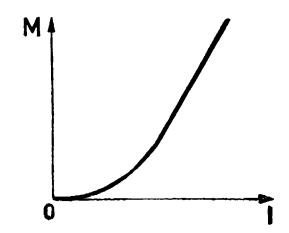


(La résistance intérieure *r* comprend ici induit et inducteur.)

Pour des valeurs faibles du courant I, le flux est encore sensiblement proportionnel au courant absorbé.

Si le courant I décroît, le numérateur de cette fraction croît, son dénominateur décroît, la vitesse augmente et peut prendre des valeurs dangereuses : ***le moteur série s'emballe à vide,*** c'est-à-dire quand il n'est pas accouplé à une machine qui oppose un couple résistant suffisant.

A forte charge, pour des valeurs importantes du couple résistant, et du courant absorbé I, le circuit magnétique devient saturé, on peut admettre que le flux inducteur devient constant ; la vitesse décroît plus lentement avec la charge.

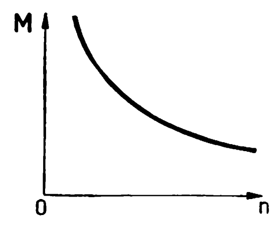




b. **Couple moteur** $M = \dfrac{N\,\Phi\,I}{2\,\pi}$

Pour de faibles valeurs du courant I, le flux est proportionnel à ce courant I, le couple moteur est de la forme KI^2.

Pour des courants importants, le flux reste sensiblement constant et le couple moteur devient proportionnel à la valeur I du courant absorbé ; ce résultat est dû à la saturation du circuit magnétique.



c. Caractéristique mécanique.

Le couple moteur est relativement grand à faible vitesse et décroît à mesure que la vitesse augmente.

Réciproquement, le moteur ralentit lorsque le couple résistant augmente, ce qui permet de le considérer comme un moteur à changement de vitesse automatique.

D'autre part, la puissance absorbée croît moins vite que le couple résistant (puisque la vitesse décroît) ; ***ceci limite l'importance des variations du courant absorbé lorsque le couple résistant varie.***

3. — EMPLOI DU MOTEUR SÉRIE

Ce moteur s'adapte particulièrement bien à la traction électrique parce que sa vitesse est très variable et son couple moteur bien adapté au service demandé.

En régime de démarrage, à faible vitesse, le couple moteur est important, le moteur doit fournir l'énergie cinétique suffisante pour la mise en route d'un matériel présentant une grande inertie.

En régime de marche à vitesse normale, le couple moteur est plus faible, le moteur n'a plus à vaincre que les divers frottements (frottements aux essieux, résistance au roulement, résistance de l'air).

Le moteur série convient aussi à l'entraînement des appareils de manutention tels que grues, treuils, ponts roulants, et à l'entraînement des ventilateurs.

Un moteur série doit rester constamment en prise, sans débrayage possible avec le matériel qu'il entraîne (la liaison par courroie ne convient pas : en cas de rupture, le moteur s'emballe).

Remarque.

Le moteur série permet d'obtenir un couple normal même sous tension réduite (c'est le cas d'un véhicule électrique se trouvant en bout d'une ligne présentant une forte chute de tension).

Dans ces conditions, la vitesse sera plus faible, la force contre-électromotrice plus petite ; le courant absorbé I peut devenir important (au besoin, on diminue la résistance du rhéostat de démarrage) ; *de ce fait,* on peut obtenir un flux inducteur et un couple moteur importants $M = \frac{NI\,\Phi}{2\,\pi}$.

Dans les mêmes conditions, un moteur shunt ne présenterait qu'un flux trop faible, fonction de la tension aux bornes des inducteurs ; un couple normal ne serait obtenu que pour un courant I dangereux pour l'induit.

4. — BILAN DES PUISSANCES DANS UN MOTEUR SÉRIE

Puissance fournie : $P = U \times I$

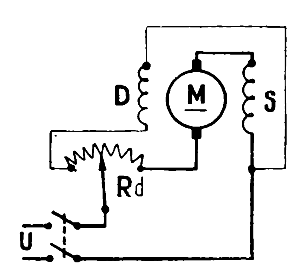
- Effet Joule dans l'induit et les inducteurs en série :
  $p_1 = (r + r') I^2$
- Puissance transformée dans l'induit en puissance mécanique :
  $P' = E'I = M\omega$ →
  (E′ force contre-électromotrice.)
  - p_2, frottements divers : mécaniques ; magnétiques ; électriques.
  - $P_1 = M\omega - p_2$, puissance mécanique disponible sur l'arbre.

Rendement du moteur : $\eta = \frac{P_1}{P}$.

III. — MOTEUR A EXCITATION COMPOSÉE (OU MOTEUR COMPOUND) ALIMENTÉ SOUS TENSION CONSTANTE

I. — MONTAGE

Ce moteur possède deux enroulements inducteurs : un enroulement série S et un enroulement dérivation D. Son montage procède des montages des moteurs des deux types série et shunt.



Ier cas : ampèretours additifs (le plus employé).

L'enroulement série et l'enroulement dérivation agissent dans le même sens.

Ce moteur possède des propriétés intermédiaires entre celles des deux types déjà étudiés ; il ressemble à l'un plutôt qu'à l'autre suivant l'importance relative des deux enroulements.

L'enroulement dérivation limite la vitesse à vide et les variations de vitesse avec la charge.

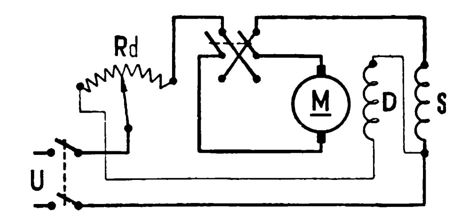
L'enroulement série lui permet de vaincre un couple résistant très variable en absorbant un courant peu variable.

2e cas : ampèretours soustractifs (d'un emploi très limité).

L'enroulement série, peu important par rapport à l'enroulement dérivation, diminue le flux lorsque la charge croît et *permet de maintenir plus constante la vitesse du moteur* ainsi modifié.

2. — CHANGEMENT DE SENS DE MARCHE

Il se pratique à l'arrêt par la manœuvre d'un inverseur sur l'alimentation de l'induit, sans inverser le courant ni dans l'inducteur série, ni dans l'inducteur dérivation.



3. — EMPLOI DU MOTEUR A EXCITATION COMPOSÉ

Ce type de moteur convient bien à l'entraînement des appareils présentant un couple résistant croissant avec la vitesse, pompes, ventilateurs, ou présentant un couple résistant discontinu, par exemple les laminoirs.

EXERCICES

1 — Un moteur série est alimenté à la tension U = 120 V ; la résistance de l'induit est 1,5 Ω, celle de l'inducteur 1 Ω ; sa puissance mécanique utile est 540 W et son rendement 0,75. Calculer :

a. la puissance absorbée et le courant fourni par le secteur;
b. les puissances perdues par effet Joule séparément dans l'induit et l'inducteur, ainsi que l'ensemble des autres pertes ;
c. le couple moteur en régime normal pour une vitesse de 1 500 t/mn;
d. la résistance du rhéostat de démarrage, si on admet pour cette période un courant double de celui du régime normal.

Réponses : 720 W ; 6 A ; 54 W ; 36 W ; 90 W ; 3,4 m.N ; 7,5 Ω.

2 — L'induit d'un moteur série bipolaire a une résistance de 0,5 Ω. Soumis à la tension de 550 V, il tourne à la vitesse de 600 t/mn et absorbe 40 A. Calculer :

a. la force contre-électromotrice dans ces conditions;
b. la puissance mécanique totale;
c. le couple moteur correspondant;
d. le flux utile, sachant que l'induit comporte 270 conducteurs. (C. A. P.)

Réponses : 530 V ; 21,2 kW (environ 29 ch) ; 338 m.N ; environ 0,2 Wb.

3 — Un moteur shunt, étant alimenté sous la tension 120 V, a une puissance de 2 ch, son rendement est 0,78, la résistance des inducteurs est 130 Ω, la résistance de l'induit 0,6 Ω, la vitesse de rotation 1 200 t/mn.

Calculer dans ces conditions : le couple moteur, les pertes par effet Joule dans les inducteurs et dans l'induit, ainsi que l'ensemble des autres pertes (frottements et pertes dans le fer).

Réponses : 11,7 m.N ; 110 W ; 132 W : 176 W.

4 — Un moteur shunt est connecté à un réseau à tension continue constante U = 120 V. Il tourne à vide à la vitesse de 2 000 t/mn pour un courant total de 3,3 A fourni par le secteur. La résistance de la portion utilisée du rhéostat de champ est alors 2,5 Ω. En charge normale, il absorbe un courant total de 55 A lorsqu'on maintient la vitesse constamment égale à 2 000 t/mn en agissant sur le rhéostat de champ.

Calculer la résistance utile du rhéostat de champ ; on suppose que la réaction magnétique d'induit est négligeable et que le circuit magnétique n'est pas saturé. Résistance de l'induit 0,25 Ω, de l'inducteur 65 Ω. (B. E. I.)

Réponse : 10,6 Ω.

32. — Génératrices bipolaires (ou dynamos)

I. — PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

1. — PROPRIÉTÉ GÉNÉRALE

Cette machine, appelée dynamo, transforme de l'énergie mécanique, fournie par un moteur associé, en énergie électrique transmise à un circuit d'utilisation.

Nous avons vu (leçon 30) que tout conducteur actif de l'induit est le siège :

— d'une force électromagnétique f,

— d'une force électromotrice d'induction e.

Dans le cas où la machine est utilisée comme génératrice, c'est la force électromotrice d'induction e qui constitue le phénomène utile.

Les forces électromagnétiques f, agissant sur les conducteurs actifs, produisent le couple résistant qui s'oppose au couple du moteur d'entraînement.

2. — FORCE ÉLECTROMOTRICE

Nous pouvons appliquer à la génératrice certains résultats obtenus dans l'étude du moteur.

En particulier, pour la même vitesse n, et le même flux inducteur Φ, la force contre-électromotrice E′ du moteur est précisément la force électromotrice induite dans le bobinage induit, c'est-à-dire la force électromotrice E de la génératrice.

Dans le cas de la dynamo bipolaire à enroulement simple, nous pouvons écrire

$$\boxed{\mathbf{E = N}n\,\Phi}$$ avec les mêmes notations.

Remarque.

Cette relation peut s'obtenir directement.

Pour un demi-tour de durée $\Delta t = \frac{1}{2\,n}$, chaque conducteur actif de l'induit coupe le flux inducteur Φ ; la force électromotrice moyenne induite dans ce conducteur s'exprime par : $e = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \Phi \times 2\,n$.

Le bobinage induit comporte deux dérivations de chacune $\frac{N}{2}$ conducteurs en série.

La force électromotrice du groupe de générateurs ainsi constitué s'exprime par :

$$E = \Phi \times 2\ n \times \frac{N}{2} = Nn\ \Phi.$$

La force électromotrice instantanée dans chaque conducteur est variable avec sa position.

Pendant des intervalles de temps très courts, égaux et successifs, dt, le flux coupé $d\Phi$ n'est pas constant.

En prenant, pour chacun de ces conducteurs, la force électromotrice moyenne, nous tenons compte du fait qu'à un instant donné les divers conducteurs occupent simultanément toutes les positions que chacun d'eux occupe successivement au cours de la rotation.

3. — TENSION AUX BORNES DE L'INDUIT

La loi d'Ohm appliquée à cette génératrice donne l'expression de la tension aux bornes $\boxed{U = E - rI}$ (leçon 11)

I est le courant débité par l'induit, r est la résistance de l'induit mesurée à ses bornes.

A flux inducteur constant, et à vitesse constante, la tension U décroît quand le courant I débité augmente, c'est-à-dire quand la charge augmente :

— d'une part, à *cause du terme* rI ;

— d'autre part, à *cause de la réaction d'induit*, fonction du courant I (cette réaction d'induit réduit le flux inducteur utile et, par suite, la force électro motrice E).

4. — COUPLE RÉSISTANT

La puissance mécanique transformée par l'induit en puissance électrique est de la forme $\boxed{P = EI}$

En négligeant les divers frottements, le couple résistant que cette génératrice oppose au couple du moteur associé a pour moment :

$$M = \frac{P}{\omega} \quad \text{ou} \quad M = \frac{EI}{\omega}$$

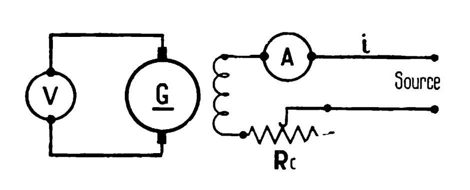
M mètres.newtons,
E volts, I ampères,
ω radians par seconde.

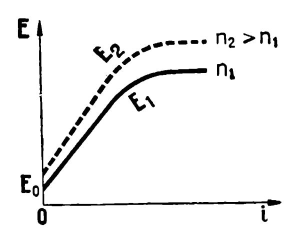
II. — GÉNÉRATRICE A EXCITATION SÉPARÉE

1. — CARACTÉRISTIQUE A VIDE

Considérons l'expression $E = Nn\,\Phi$.

Pour une vitesse de rotation n donnée, la force électromotrice E est proportionnelle au flux inducteur Φ. Celui-ci est réglable par variation du courant inducteur i d'une source auxiliaire. La force électromotrice E est donc fonction du courant d'excitation i.





La courbe représentant E en fonction du courant d'excitation I est la caractéristique à vide de la dynamo, pour la vitesse n donnée.

Pour un courant d'excitation nul, le flux n'est pas nul ; il dépend de l'aimantation rémanente.

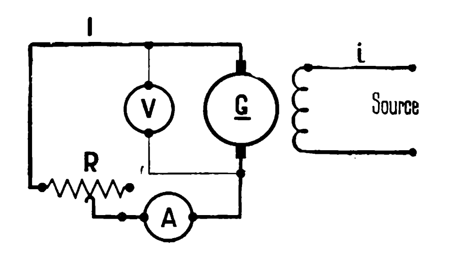
Tant que le circuit magnétique n'est pas saturé (i faible), le flux Φ est proportionnel au courant i : il en est de même pour E. A partir de la saturation (i grand), le flux augmente très peu avec i : il en est de même pour E.

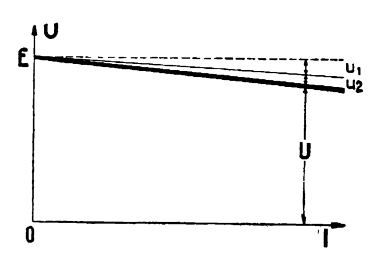
La courbe est semblable à celle de l'aimantation du circuit magnétique.

Pour différentes valeurs de la vitesse n, on obtient diverses caractéristiques à vide (pour $n_2 > n_1$, $E_2 > E_1$ à flux égal).

2. — CARACTÉRISTIQUE EN CHARGE

C'est la courbe de la tension U aux bornes de l'induit en fonction du courant I qu'il débite, pour un courant d'excitation i constant et une vitesse de rotation constante.





Cette tension $U = E - rI$ décroît quand le courant débité augmente (rI augmente et la réaction d'induit est plus grande).

III. — GÉNÉRATRICES AUTOEXCITÉES

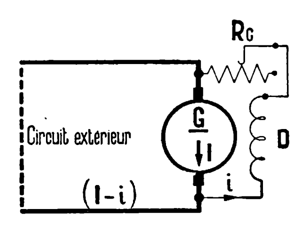
L'excitation séparée d'une génératrice exige l'emploi d'une source auxiliaire à courant continu. Pour s'affranchir de cette nécessité, *on prend sur la génératrice elle-même le courant nécessaire à sa propre excitation*, *on obtient une génératrice autoexcitée.*

La puissance absorbée par l'excitation est faible devant la puissance développée par l'induit, environ 2 %.

I. — GÉNÉRATRICE EXCITÉE EN DÉRIVATION OU DYNAMO SHUNT

a. Montage.

Les inducteurs D sont constitués par des bobinages à spires nombreuses, en fil relativement fin, donc résistants.



Ces inducteurs, avec le rhéostat de champ (qui permet de régler l'excitation), sont alimentés à la même tension que le circuit extérieur.

Une partie relativement faible i du courant I débité par l'induit (dans le cas de la dynamo en charge) constitue le courant d'excitation; (I-i) est le courant dans le circuit extérieur.

b. Amorçage. Fonctionnement à vide.

Le circuit extérieur étant ouvert, l'induit est entraîné à vitesse constante dans un sens déterminé.

L'aimantation rémanente du circuit magnétique produit un *flux relativement faible* à travers l'induit.

Une *faible force électromotrice* d'induction apparaît dans l'induit et donne naissance à un *faible courant d'excitation* dans les inducteurs.

Deux cas sont à considérer :

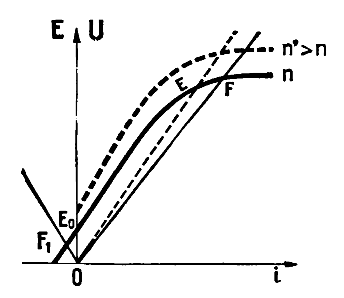
1er cas.

Le sens des connexions induit-inducteurs et le sens de rotation sont tels que le courant d'excitation renforce l'aimantation rémanente ; dans ce cas, la force électromotrice induite croît, ainsi que le courant d'excitation : *la dynamo s'amorce.*

Remarque.

A une vitesse donnée, le point de fonctionnement F correspond à l'intersection de la courbe E fonction de i, caractéristique à vide de la dynamo excitée séparément, et de la courbe $U = r'i$, tension aux bornes communes des inducteurs et de l'induit (r' est la résistance des inducteurs avec le rhéostat de champ).

Pour de faibles variations de la résistance r', par modification du réglage du rhéostat d'excitation, on obtient le pivotement de la droite $r'i$ autour de l'origine.



Pour de faibles variations de la vitesse, on obtient un faible déplacement de la caractéristique à vide.

La stabilité de la force électromotrice correspond à de faibles déplacements du point F ; le point de fonctionnement se trouve alors sur la région de la caractéristique correspondant à une forte saturation du circuit magnétique.

On ne recherche pas systématiquement cette stabilité, car la saturation demande des inducteurs plus importants et entraîne une baisse de rendement.

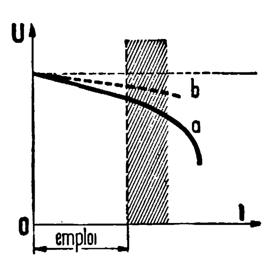
2e cas.

Le sens des connexions induit-inducteurs et le sens de rotation sont tels que le courant inducteur diminue le magnétisme rémanent préexistant : la génératrice ne s'amorce pas, le sens des connexions est mauvais pour ce sens de rotation.

Remarque.

Le courant i peut être considéré comme négatif, le point de fonctionnement F_1 est tel que la force électromotrice E est plus faible que celle E_0 que l'on obtiendrait pour un circuit inducteur coupé.

c. Fonctionnement en charge.



La dynamo débite sur un circuit extérieur de résistance variable. Quand la charge, c'est-à-dire le courant débité augmente, pour une vitesse constante, la chute de tension $u_1 = Ir$ croît dans l'induit, ainsi que la réaction d'induit u_2, ce qui a pour effet de diminuer la tension U aux bornes de l'induit. De ce fait, il y a diminution du courant inducteur i et, par suite, diminution du flux inducteur Φ.

La tension U baisse plus rapidement (a) que dans le cas d'une génératrice à excitation séparée (b) quand le débit augmente.

(Au delà d'une certaine valeur du courant débité, la dynamo se désamorce.)

Pratiquement, on utilise la dynamo shunt pour des valeurs du courant débité correspondant à la partie supérieure de la courbe.

Dans cette limite, on peut remédier à la chute de tension :

— soit par augmentation du flux, c'est-à-dire par réglage du rhéostat de champ (procédé le plus souvent employé) ;

— soit par augmentation de la vitesse de rotation, si le moteur associé se prête à ce réglage.

d. Emploi de la dynamo shunt.

Ce type de génératrice est très utilisé pour les avantages qu'il présente.

La dynamo shunt s'amorce à vide, et en charge, c'est-à-dire en circuit ouvert et en circuit fermé.

Elle permet d'obtenir une tension qui diminue peu quand la charge croît (jusqu'à une valeur limitée du courant débité).

En particulier, la dynamo shunt est employée pour la recharge des accumulateurs.

e. Bilan des puissances pour la dynamo shunt.

Puissance mécanique fournie par le moteur d'entraînement : $\mathbf{P_1 = M\omega}$.

- p_1 = puissance absorbée par les divers frottements : mécaniques, magnétiques, électriques.
- $\mathbf{P' = M\omega - p_1 = EI}$, puissance mécanique transformée en puissance électrique dans l'induit.
  - $p_2 = r\mathbf{I}^2$, effet Joule dans l'induit.
  - $p_3 = r'i^2$, effet Joule dans les inducteurs.
  - $\mathbf{P = U\,(I} - i\mathbf{)}$, puissance électrique appelée par le circuit d'utilisation.

Rendement de la génératrice shunt :

$$\eta = \frac{P}{P_1} = \frac{\text{Puissance électrique utilisable}}{\text{Puissance mécanique fournie par le moteur associé}}.$$

2. — GÉNÉRATRICE EXCITÉE EN SÉRIE OU DYNAMO SÉRIE

a. Montage.

L'*enroulement inducteur* S présente en général peu de spires de fil relativement gros ; il est *associé en série* avec l'induit et le circuit extérieur.

Quand la dynamo débite, le courant I traverse l'induit et les inducteurs.

On peut régler l'excitation par un rhéostat de champ mis en parallèle aux bornes des inducteurs.

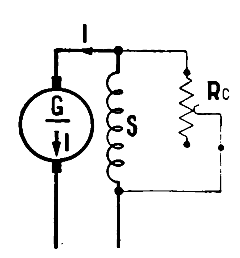
b. Fonctionnement.

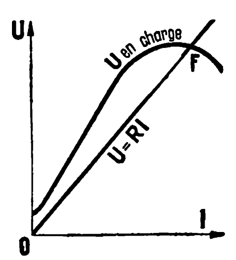
A vide, le flux dû au magnétisme rémanent provoque une faible force électromotrice, mais aucun courant ne parcourt induit et inducteurs puisque le circuit est ouvert.

En fermant ce circuit sur une résistance extérieure, pour un sens de rotation donné de l'induit, deux cas peuvent se produire :

1er cas : le faible courant produit par la force électromotrice due au flux rémanent renforce ce flux : la dynamo s'amorce ;

2e cas : ce courant diminue le flux préexistant : la dynamo ne s'amorce pas.





Caractéristique en charge.

C'est la courbe de la tension U aux bornes de la machine en fonction du courant débité I, pour une vitesse de rotation donnée.

La tension U croît d'abord rapidement, puis atteint son maximum.

Elle décroît, lorsque la chute de tension dans l'induit et l'inducteur série $(r + r')$ I ainsi que la réaction d'induit deviennent importantes.

Elle décroît lorsque la saturation du circuit magnétique est atteinte.

Remarque.

Pour une résistance R du circuit extérieur, la tension aux bornes de la dynamo est :

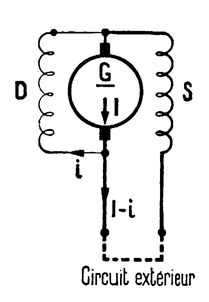
$$U = RI$$

Le point de fonctionnement F, correspondant à un circuit extérieur de résistance donnée R, est fourni par l'intersection de la caractéristique en charge d'une part, et de la droite $U = RI$.

c. Emploi de la dynamo série.

Il est très limité, il se réduit à des applications spéciales, par exemple comme survolteur sur réseau continu pour compenser la chute de tension en ligne.

3. — GÉNÉRATRICE A EXCITATION COMPOSÉE (OU DYNAMO COMPOUND)



a. Montage.

Cette dynamo est à la fois génératrice dérivation, et génératrice série. Elle comporte sur chaque pôle *deux enroulements inducteurs* différents dont les flux, en général, s'ajoutent.

L'*enroulement dérivation D* comporte des spires nombreuses, de fil relativement fin.

L'*enroulement série S*, de faible résistance, comporte peu de spires de fil assez gros pour supporter le courant débité par l'induit.

b. Fonctionnement.

La machine est surtout une génératrice dérivation, l'importance des inducteurs dérivation est grande par rapport à celle des inducteurs série. Elle s'amorce à vide.

En charge, la chute de tension aux bornes d'une dynamo shunt se trouve évitée par l'enroulement inducteur série qui maintient le flux lorsque la charge croît.

Remarque.

Lorsque la charge augmente, la vitesse du moteur d'entraînement associé à la génératrice diminue, ce qui est une cause supplémentaire de baisse de tension. L'enroulement inducteur série permet de compenser cette baisse de tension.

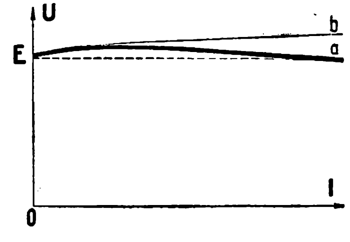
c. Emploi des dynamos à excitation composée.

La caractéristique en charge (courbe *a*) montre que *la tension à ses bornes peut être sensiblement constante même pour des débits importants* ; elle constitue une amélioration de la génératrice shunt.

Dans certains cas, pour un nombre suffisant de spires sur l'enroulement série, on peut même obtenir une caractéristique montante (courbe *b*).

Comme génératrice d'alimentation d'un réseau continu, cette dynamo permet la compensation de la chute de tension en ligne avec la charge.

Pour certains usages très particuliers, par exemple dans le cas de la soudure à l'arc en courant continu, les ampèretours de l'enroulement série sont en sens opposé des ampèretours de l'enroulement dérivation. Ce dispositif permet de diminuer le courant I au moment du court-circuit provoqué à l'allumage de l'arc.



Remarque.

Les réseaux de distribution d'énergie électrique fournissent du courant alternatif.

Il existe des appareils simples qui, alimentés en courant alternatif, fournissent du courant continu adapté à tous les usages (électrochimie, traction électrique...).

Les génératrices à courant continu présentent de moins en moins d'intérêt industriel.

EXERCICES

1 — A quelle vitesse doit tourner une dynamo bipolaire dont l'induit comporte 672 conducteurs, pour que la force électromotrice soit de 125 V lorsque le flux utile est de 0,008 Wb ?
Réponse : 1 400 t/mn (environ).

2 — Une dynamo bipolaire shunt comporte un induit de 600 conducteurs actifs tournant à la vitesse de 1 800 t/mn dans un flux utile de 0,006 Wb. Calculer :
a. la force électromotrice de cette dynamo ;
b. la tension aux bornes de l'induit, de résistance 1,5 Ω, pour un courant de 10 A débité par cet induit (excitation maintenue constante par rhéostat de champ) ;
c. le courant d'excitation, les inducteurs ayant une résistance de 80 Ω avec le rhéostat de champ dans les conditions de *b* ;
d. la puissance fournie au circuit extérieur et le rendement électrique de cette dynamo.
Réponses : 108 V ; 93 V ; 1,16 A ; 820 W ; 0,76.

3 — Une dynamo bipolaire shunt charge une batterie de 40 éléments d'accumulateurs en série avec un rhéostat dans les conditions suivantes : résistance de l'induit 1 Ω, résistance des inducteurs 80 Ω, résistance de chaque élément d'accumulateur 0,01 Ω, rhéostat réglé à 1,6 Ω, le courant de charge est de 5 A et la tension aux bornes de la batterie 88 V. Calculer :
a. la tension aux bornes de la dynamo, sa force électromotrice, son rendement électrique ;
b. la vitesse de rotation, si l'induit comporte 600 conducteurs actifs coupant un flux utile de 0,005 Wb ;
c. la puissance perdue par effet Joule dans les divers éléments du circuit.
Réponses : 96 V ; 102 V ; 0,75 ; 34 t/s ; pertes Joule : induit 38 W, inducteurs 115 W, batterie 10 W, rhéostat 40 W.

4 — Une dynamo compound, longue dérivation (l'inducteur shunt connecté aux bornes de sortie de la machine), débite dans le circuit extérieur un courant de 30 A sous 110 V, la résistance de l'induit est 0,25 Ω, celle de l'inducteur série 0,15 Ω, celle de l'inducteur shunt 110 Ω. Déterminer :
a. les pertes par effet Joule dans les divers éléments ;
b. la puissance utile et la puissance électrique totale mises en jeu, ainsi que la force électromotrice de la dynamo ;
c. le rendement de cette dynamo si les autres pertes sont équivalentes à celles par effet Joule.
Réponses : 240 W ; 144 W ; 110 W ; 3 300 W ; 3 794 W ; 122 V ; 0,77.

MÉTHODES DE ZÉRO

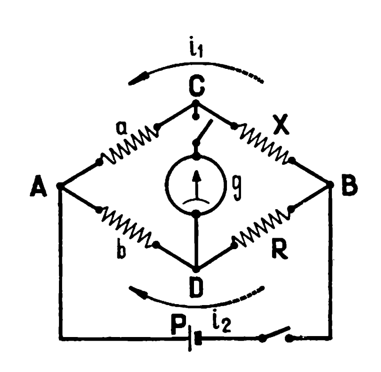
Les indications d'un ampèremètre ou d'un voltmètre employés simultanément sont toujours entachées d'une erreur systématique (chute de tension $u = \mathrm{I}r$ dans l'ampèremètre et courant $i = \frac{\mathrm{U}}{r}$ dans le voltmètre, r résistance de l'appareil considéré).

Pour des mesures de précision, on est amené à réaliser des montages dans lesquels le courant dans l'appareil de mesure est nul au moment de la mesure. L'aiguille (ou le spot) reste au zéro de la graduation. Utiliser un tel montage, c'est employer une *méthode de zéro.*

I.— Mesure d'une résistance X.

Pont de Wheatstone.

P est une source de courant (pile ou accumulateur). X est branchée entre B et C, a, b et R sont des résistances connues (boîtes de résistances, par exemple). Le galvanomètre g est monté en pont entre C et D.



Pour a et b données, on fait varier R pour obtenir l'équilibre du pont (galvanomètre g au zéro). Aucun courant ne traverse alors le galvanomètre, les deux points C et D ne présentent aucune différence de potentiel.

Si i_1 est le courant dans ACB, et i_2 le courant dans ADB, on a :

tension entre A et C = tension entre A et D, soit : $i_1 a = i_2 b$ (1),

tension entre B et C = tension entre B et D, soit : $i_1 \mathrm{X} = i_2 \mathrm{R}$ (2).

La division, membre à membre, de ces relations

donne : $\frac{\mathrm{X}}{a} = \frac{\mathrm{R}}{b}$ ou $\boxed{\mathrm{X} = \frac{a}{b} \times \mathrm{R}}$;

cette relation est indépendante des courants, donc du générateur.

Le choix du rapport $\frac{a}{b}$ permet de faire varier la sensibilité de la mesure :

si R est connu, à 1 Ω près, pour $\frac{a}{b} = 1$, X est obtenu à 1 Ω près ;

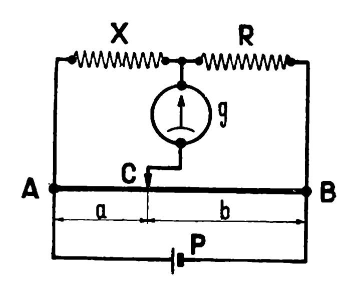
pour $\frac{a}{b} = \frac{1}{10}$, on obtient X à $\frac{1}{10}$ Ω près...

Ce montage est réalisé dans les *boîtes à pont.*

Pont à corde.

Le montage réalisé est analogue au précédent, $\mathrm{X} = \frac{a}{b} \times \mathrm{R}$, ici a et b font partie d'une corde ou fil AB homogène, bien calibré, R est fixé à priori (au voisinage de la grandeur à mesurer si possible). La manœuvre du curseur C permet d'obtenir l'équilibre (le galvanomètre g au zéro) par la variation du rapport $\frac{a}{b}$.

Les résistances a et b sont proportionnelles à leur longueur.



2. — Mesure d'une force électromotrice.

Montage en potentiomètre.

La source S débite le courant I dans la résistance calibrée AB.

La tension U entre A et le point variable du curseur C placé en M est proportionnelle à la longueur AM.

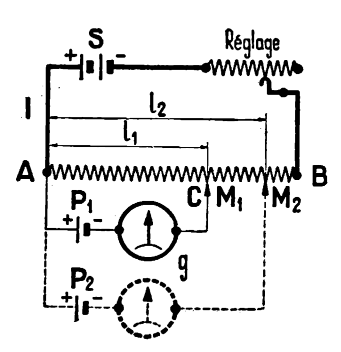
Le galvanomètre g est monté en série avec le générateur P_1 à étudier ; ce générateur est en opposition avec la source S (polarités inverses).

Pour une position convenable M_1 du curseur, le montage est équilibré, le galvanomètre g est au zéro.

La force électromotrice E_1 de P_1, qui ne débite pas, équilibre la tension $U_1 = IR_1$; on a alors $E_1 = K \times l_1$ (K constante de proportionnalité).

En remplaçant le générateur P_1 par un générateur P_2 étalon de force électromotrice connue E_2, le galvanomètre g marque zéro pour une position M_2 du curseur telle que $E_2 = K \times l_2$.

On en déduit $\frac{E_1}{E_2} = \frac{l_1}{l_2}$ quotient de deux longueurs ; la force électromotrice à mesurer est $E_1 = E_2 \times \frac{l_1}{l_2}$.



EXERCICES D'APPLICATION

1 — Une série de mesures au pont de Wheatstone a donné les résultats suivants :

Pour $a = b = 100\ \Omega$, avec $R = 37\ \Omega$, le galvanomètre g dévie à gauche ; avec $R = 38\ \Omega$, il dévie à droite.

Pour $a = 100\ \Omega$, $b = 1\ 000\ \Omega$, avec $R = 374\ \Omega$, g dévie à gauche ; avec $R = 375\ \Omega$, il dévie à droite.

Pour $a = 10\ \Omega$, $b = 1\ 000\ \Omega$, avec $R = 3\ 746\ \Omega$, g dévie à gauche ; avec $R = 3\ 747\ \Omega$, il dévie à droite.

Expliquer les résultats et donner la valeur de R ; précision.

2 — On réalise un pont à corde pour mesurer la résistance X à froid d'une lampe marquée 60 W-120 V. On a pris $R = 40\ \Omega$ à l'équilibre du pont ; a et b mesurent respectivement sur le fil calibré, 26 et 34 cm (même disposition que dans l'étude précédente).

a. Déterminer la valeur de X (la pile qui alimente le montage ne provoque pas un échauffement sensible de la lampe).

b. Calculer la résistance à chaud (1 800° C) en fonctionnement normal de cette lampe et en déduire le coefficient de température du filament (température ambiante 20° C).

3 — On mesure la force électromotrice d'une pile P_1 par la méthode d'opposition, montage potentiométrique, en utilisant un conducteur AB bien calibré sur lequel se déplace le curseur C. Pour la pile P_1, l'équilibre est obtenu pour la position du curseur défini par $AM_1 = l_1 = 22{,}5$ cm (même disposition que dans l'étude précédente).

Pour un élément étalon Daniell de force électromotrice 1,08 V, l'équilibre est obtenu pour le curseur en M_2 tel que $AM_2 = l_2 = 16{,}2$ cm.

Calculer la force électromotrice de la pile P_1.

EXERCICES DE RÉVISION

1 — Sur un circuit d'utilisation, un ampèremètre de contrôle indique respectivement 4,5 A pendant 20 mn, 3 A pendant 2 h, 2 A pendant 45 mn.

1° Quelle serait l'indication d'un compteur de quantité d'électricité monté sur ce circuit pour l'ensemble de ces trois périodes ?

2° Exprimer en coulombs la quantité d'électricité mise en jeu.

3° Quel courant constant transporterait cette même quantité d'électricité en 1 h 36 mn ?

2 — Un petit moteur électrique développe une puissance mécanique de 0,5 ch quand il est traversé par un courant de 5 A. Quel est le rendement du moteur si la tension de fonctionnement est 120 V ?

3 — Une installation, alimentée sous la tension 120 V, comprend : 20 lampes de 40 W, 1 moteur de puissance mécanique 1,5 ch et de rendement 0,8, 1 réchaud de 570 W.

Calculer la puissance électrique absorbée par l'installation et le courant débité par la ligne lorsque ces appareils fonctionnent simultanément.

4 — Le compteur d'énergie d'une installation porte les indications 120 V — 10 A. Combien peut-on allumer de lampes de 25 W lorsque fonctionnent simultanément un moteur de 0,25 ch (rendement 0,75) et un réchaud de 600 W ?

5 — ***Mesure de résistance, montage amont.***

Une source alimente une résistance R en série avec un ampèremètre A. Aux bornes de l'ensemble RA, on place un voltmètre V en dérivation.

On lit à l'ampèremètre : $I = 2,5$ A ; au voltmètre : $U = 12$ V.

a. Calculer la valeur approximative de la résistance R.

b. Sachant que la résistance de l'ampèremètre est 0,2 Ω et la résistance du voltmètre 6 000 Ω, calculer la valeur exacte de la résistance R.

6 — ***Mesure de résistance, montage aval.***

La résistance R est montée en série avec un ampèremètre ; un voltmètre est branché directement aux bornes de R.

On lit à l'ampèremètre $I = 0,2$ A ; au voltmètre : $U = 120$ V.

a. Calculer la valeur approximative de la résistance R.

b. Sachant que la résistance de l'ampèremètre est 0,3 Ω et celle du voltmètre 6 000 Ω, calculer la valeur exacte de la résistance R.

7 — ***Mesure d'une très grande résistance R à l'aide d'un voltmètre.***

On dispose d'un voltmètre marqué 150 V, 50 000 Ω; branché seul sur le secteur, il indique $U_1 = 120$ V; branché avec R en série sur ce secteur, il indique $U_2 = 8$ V. Calculer R.

8 — On dispose d'un milliampèremètre gradué de 0 à 100 mA, pour 50 divisions sur le cadran; la résistance de l'appareil est $r_1 = 4$ Ω. Quelle résistance additionnelle r_2 doit-on ajouter à l'appareil pour le transformer en voltmètre utilisable de 0 à 150 V ? Que vaut, dans ce cas, une division de l'appareil ?

9 — Un récipient mince contient 10 l d'eau, on observe qu'il se refroidit à la vitesse de 2° par minute. Pour maintenir sa température constante, on immerge une résistance chauffante utilisée sous une tension de 120 V. On demande : la puissance de l'installation, le courant absorbé et la résistance à utiliser.

10 — Le four d'une cuisinière à gaz nécessite, pour être porté à sa température normale, la combustion de 300 l de gaz de ville à 3 200 mth par mètre cube. On remplace le brûleur à gaz par un jeu de résistances électriques alimentées sous la tension de 110 V. On demande :

a. la consommation d'énergie électrique nécessaire à l'obtention de la même température, sachant que le chauffage au gaz a un rendement de 0,6 et que le chauffage électrique s'effectue sans perte.

b. Comparer les prix de revient des deux modes de chauffage, le gaz est payé 30 F le mètre cube, l'électricité 28 F le kilowattheure.

c. Pour un courant de 10 A, quelle est la durée minimum du chauffage électrique pour obtenir la température normale du four ?

11 — Un radiateur électrique de puissance maximum 3 kW est constitué par deux résistances de valeur double l'une de l'autre, qu'un contacteur permet d'utiliser soit en dérivation, soit séparément, soit en série, afin d'obtenir quatre allures de chauffe.

a. L'appareil étant alimenté par le secteur de tension 120 V, quelles sont la puissance et l'intensité correspondant à chaque allure de marche ?

b. Les résistances chauffantes sont constituées par un alliage de résistivité 100 $\mu\Omega$. cm²/cm, capable de supporter un courant maximum de 8 A/mm². Choisir le diamètre du fil approprié à la construction de chacune et la longueur qu'il convient d'en utiliser.

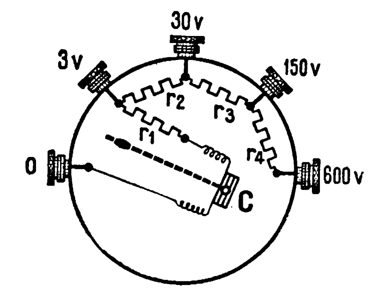
(Le commerce livre le fil résistant par diamètres variant de 0,1 mm.) (B. E. I.)

12 — On veut fabriquer une couverture chauffante avec un fil résistant de 0.25 mm de diamètre. Quelle doit être la longueur du fil mesurée à 0° C pour que la quantité de chaleur dégagée en 1 heure soit de 150 000 μth ? L'intensité absorbée ne doit pas dépasser 0,8 A pour une température du fil de 50° C (résistivité du fil à 0° C = 80 $\mu\Omega$. cm²/cm ; coefficient de température 0,009) (C. A. P.).

13 — Un voltmètre à plusieurs sensibilités comporte un cadre mobile C de résistance 10 Ω et des résistances additionnelles r_1, r_2, r_3, r_4, permettant d'obtenir les sensibilités 3 V, 30 V, 150 V, 600 V correspondant aux 150 divisions du cadran.

La déviation maximum de l'aiguille est obtenue pour un courant de 2 mA traversant le cadre.

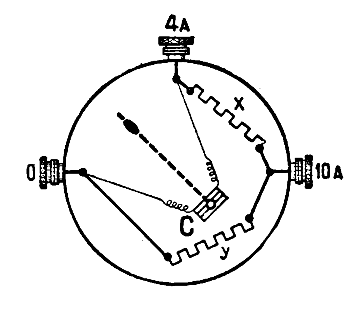
Calculer les diverses résistances additionnelles.



14 — Une ligne 120 V alimente en dérivation : six lampes 120 V-40 W ainsi qu'une batterie d'accumulateurs en charge. Cette batterie comprend 50 éléments de capacité 80 Ah, de résistance unitaire 0.01 Ω, de force électromotrice 2 V à l'instant considéré. Un rhéostat de réglage en série avec la batterie permet de régler le courant de charge à une valeur égale, en ampères, au 1/10 de la mesure de la capacité en ampères-heure.

Déterminer la résistance actuelle du rhéostat ainsi que le courant total et la puissance fournis par la ligne.

15 — Un ampèremètre à deux sensibilités : 0-4 A et 0-10 A, comporte un cadre mobile C de résistance 1,56 Ω et un système de shunts x et y. La déviation maximum de l'aiguille est obtenue pour un courant de 0,1 A traversant le cadre, calculer les résistances x et y.



16 — On dispose d'un fil de fer (longueur 1 m, section circulaire de diamètre 0,4 mm. résistivité à zéro degré 9,5 μΩ.cm²/cm). On plonge cette résistance dans un récipient bien calorifugé, de capacité calorifique négligeable, contenant 0,75 l de pétrole (densité 0,8, chaleur spécifique 0,5) à la température initiale 0° C.

La résistance est branchée aux bornes d'une batterie d'accumulateurs de 4 V, de résistance négligeable. Calculer :

a. l'élévation de température du pétrole par minute au début de l'expérience (au voisinage de 0° C) ;

b. l'élévation de température du pétrole par minute en fin d'expérience (au voisinage de 100° C) ; coefficient de température de la résistance $\alpha = 0,005$;

c. la quantité d'électricité débitée par la source pour obtenir l'élévation de température de 0 à 100° C.

17 — Un courant, dont l'intensité est de 1 A, passe pendant 1 s dans un fil de platine de 0,1 mm de diamètre. En supposant qu'aucun refroidissement du fil ne se produise pendant l'expérience, calculer l'élévation de température de ce fil. Densité du platine 22, chaleur spécifique 0,03 μth/g/° C, résistivité moyenne 10 μΩ.cm²/cm.

18 — Une ampoule électrique porte les indications 130 V-500 W.

a. Que signifient ces inscriptions ? Quel est le courant normal dans le filament ?

b. Peut-on utiliser l'ampoule branchée directement sur le réseau 220 V (justifier votre réponse)? On décide de faire fonctionner normalement cette ampoule en la montant en série avec une résistance entre les bornes du réseau 220 V.

c. Quelle est la valeur de la résistance à employer ?

d. Quelle puissance absorbe cette résistance ?

Pour fabriquer cette résistance, on dispose d'un fil de maillechort de 0,4 mm de diamètre et dont la résistivité vaut 23,4 μΩ.cm²/cm. Ce fil ne peut supporter une densité de courant supérieur à 18 A/mm².

e. Quel est le courant maximum admissible dans ce fil ? Quel montage faut-il adopter ?

f. Quelle est la longueur de fil nécessaire ? (B. E. I.)

19 — *a.* Un voltmètre relié aux bornes d'une batterie d'accumulateurs marque 80 V lorsque la batterie ne fournit aucun courant et 50 V lorsque la batterie fournit un courant de 25 A dans une résistance R. Calculer R et la résistance r de la batterie (on suppose que la résistance du voltmètre est extrêmement grande).

b. Le courant tombe à 16 A lorsqu'un moteur qu'on empêche de tourner est mis en série avec la résistance R. Calculer la résistance intérieure r' de ce moteur ainsi que l'indication du voltmètre toujours relié aux pôles de la batterie.

c. Si on laisse tourner le moteur en lui faisant soulever une charge par l'intermédiaire d'un train d'engrenages, le courant est réduit à 10 A. Quelle est la force contre-électromotrice de ce moteur et la tension à ses bornes ?

d. Calculer la puissance absorbée par le moteur quand il tourne.

e. Quelle est, en chevaux vapeur, la puissance recueillie sur l'arbre ? (On suppose les frottements négligeables.) (B. E. I. partiel.)

(Il s'agit d'un moteur série ; réaction d'induit négligeable.)

20 — Une installation d'électroplasie dispose d'un générateur G, de force électromotrice 4 V et de résistance intérieure 0,01 Ω alimentant en dérivation :

a. Un bain de cuivrage B_1 calculé pour absorber 30 A sous une différence de potentiel de 1,5 V ; ce bain, situé à 6 m de G, est relié à G par des conducteurs de cuivre de section $s_1 = 10$ mm² ; on a disposé sur ce circuit un ampèremètre A_1 et un rhéostat de réglage Rh_1.

b. Un bain de nickelage B_2, calculé pour absorber 50 A sous une différence de potentiel de 2,5 V ; ce bain, situé à 6 m de G, est relié à G par des conducteurs de cuivre de section $s_2 = 15$ mm² ; on a disposé sur ce circuit un ampèremètre A_2 et un rhéostat de réglage Rh_2.

On donne, cuivre : résistivité 1,6 µΩ. cm²/cm, Cu = 64, valence 2 ; nickel : Ni = 59, valence 2.

Calculer :

1° le courant fourni par la dynamo et la puissance nominale de ce générateur ;

2° les résistances R_1 et R_2 des conducteurs reliant G à B_1 et B_2 ;

3° la chute de tension maximum dans Rh_1 quand le circuit de B_2 est ouvert, la chute de tension maximum de Rh_2 quand le circuit de B_1 est ouvert ;

4° la masse de cuivre et la masse de nickel déposées en 1 h de fonctionnement en régime maximum ;

5° les pertes maxima par effet Joule en dehors des bacs à électrolyse. (B. E. I.)

21 — Un camion électrique de 3 tonnes (à vide) est alimenté par une batterie d'accumulateurs au plomb de 60 éléments (chacun ayant une force électromotrice moyenne de 2 V). On veut assurer une autonomie de route de 4 heures et une puissance mécanique constante de 10 ch (rendement des moteurs 0,85). Quelle est la capacité de la batterie d'alimentation et le poids de cette batterie de capacité massique 15 Ah par kilogramme et par élément ?

22 — L'équipement électrique d'un camion se compose de deux batteries de 6 V associés en tension (en série). Elles débitent 12 A en régime continu de 5 heures. Des mesures faites au voltmètre sur chaque élément indiquent : à circuit ouvert 2,2 V, à circuit fermé 1,84 V. Calculer :

a. la quantité d'électricité débitée ;

b. la quantité d'électricité absorbée pendant la charge si le rendement en quantité est de 90 % ;

c. la valeur du courant lors de la charge qui s'effectue en 9 heures ;

d. la résistance intérieure d'un élément ;

e. la quantité d'électricité qui serait nécessaire à la charge de ces batteries montées en parallèle ;

f. quelle doit être la valeur de la force électromotrice de charge si on adopte le montage en série des batteries ? — Même question si l'on adopte le montage en parallèle. (C. A. P.)

23 — On charge une batterie d'accumulateurs à l'aide d'une dynamo dont la tension aux bornes est constante dans les limites d'emploi et égale à 104 V. La batterie, montée en série avec un rhéostat, comporte 40 éléments, chacun a une résistance de 0,02 Ω et une force électromotrice qui varie de 1,8 V à 2,4 V pendant la charge :

a. La résistance du rhéostat étant réglée à 2,4 Ω entre quelles limites varie le courant de charge ? Peut-on prévoir un disjoncteur qui débranchera la batterie en fin de charge ?

b. En réduisant progressivement la résistance du rhéostat peut-on maintenir sensiblement constant le courant de charge ?

24 — On dispose d'un ampèremètre de résistance $g = 0{,}38\ \Omega$, le cadran est gradué de 0 à 2 A pour 100 divisions au cadran.
On veut réaliser un shunt pour utiliser cet ampèremètre à la mesure de courants de 0 à 40 A.

a. Que vaut, dans chaque cas, une division de l'appareil ?

b. Quelle est la résistance du shunt à utiliser ?

c. Quelle longueur d'une barrette de zinc de section rectangulaire $3 \times 0{,}5\ \text{mm}^2$, de résistivité $6\mu\Omega\ .\ \text{cm}^2/\text{cm}$, doit-on prendre pour le réaliser ?

25 — ***Mesure d'une résistance faible R à l'aide d'un ampèremètre et d'un shunt.***
On dispose du shunt de l'ampèremètre marqué 20 A - 0,003 2 Ω ; on monte ce shunt *s* en série avec R, on alimente ce circuit sous la tension constante U.
Branché aux bornes du shunt, l'ampèremètre marque 82 divisions ; aux bornes de R, il indique 35 divisions. Calculer R.

26 — Une bobine longue de 25 cm² de section, de 50 cm de longueur, porte 500 spires. Autour de sa section médiane, et présentant le même axe, se trouve une bobine plate de 150 spires, de résistance 250 Ω. Cette dernière bobine est reliée à un galvanomètre balistique (qui mesure une quantité d'électricité) de résistance 1 050 Ω. La coupure du courant dans la première bobine provoque la déviation du galvanomètre correspondant à 4 μ C. Exprimer, en fonction de la durée de coupure, t en secondes, la force électromotrice moyenne induite dans la seconde bobine ; calculer le flux qui traversait, avant la coupure, chacune de ses spires, et le courant qui parcourait la première bobine.

27 — Dans un entrefer où l'induction magnétique $\mathcal{B} = 500$ Gs est uniforme, les lignes de flux horizontales, on place horizontalement un cadre carré, de 4 cm de côté formé de 20 spires, de manière que deux de ses côtés soient parallèles aux lignes du flux. Ce cadre peut pivoter autour de son axe de symétrie horizontal perpendiculaire aux lignes du flux.

a. Le cadre est parcouru par un courant de 0,5 A ; calculer le couple électromagnétique qui le sollicite. Comment varie ce couple au cours d'une rotation du cadre de 90° ?

b. Un tambour de 1 cm de rayon est fixé sur l'axe et peut entraîner, par l'intermédiaire d'un fil enroulé sur sa circonférence, une charge suspendue p. Pour $p = 5$ g, déterminer la position d'équilibre du cadre parcouru par le courant 0,5 A. Ce dispositif permet-il la mesure d'une induction magnétique ?

28 — Un wattmètre à plusieurs sensibilités porte pour le circuit fil fin (cadre mobile) les bornes 0 V, 30 V, 120 V et, pour le circuit gros fil, deux bornes et un système de barrettes permettant de connecter en série ou en parallèle deux bobines identiques B_1 et B_2 alignées sur un même axe, entre lesquelles se meut le cadre mobile. Une combinaison de barrettes correspond à I, variable de 0 à 5 A, l'autre combinaison à I variable de 0 à 10 A ; préciser de quel montage de B_1 et de B_2 il s'agit pour chaque combinaison. Quel dispositif permet d'obtenir plusieurs sensibilités pour les tensions ?
Le cadran du wattmètre porte 120 divisions ; établir, pour chaque sensibilité de l'appareil, la valeur d'une division (la puissance maximum pour chaque sensibilité correspond à 120 divisions du cadran).

29 — Un moteur bipolaire, dont l'inducteur émet un flux de 0,1 Wb, tourne à la vitesse de 1 200 t/mn. L'induit, qui comporte 300 conducteurs actifs, absorbe un courant de 25 A.

Calculer, dans ces conditions :

a. la puissance mécanique développée dans l'induit et le couple moteur ;

b. la force contrélectromotrice et la tension aux bornes de l'induit si ce dernier a une résistance de 0,9 Ω.

30 — Un moteur bipolaire dont le circuit de l'induit a une résistance de 0,6 Ω (mesurée entre les bornes d'alimentation) est branché sur un secteur à courant continu à tension constante 220 V. La puissance mécanique utile du moteur est 3 kW, son rendement 0,8.
Calculer la résistance du rhéostat de démarrage à utiliser si le courant admissible au démarrage est 1,5 fois le courant de régime normal.

31 — Un moteur série actionne un treuil capable d'élever une masse de 2 tonnes à 6 m de hauteur en 1 minute. Le rendement du treuil est 0,75, le rendement du moteur 0,8. On suppose que les pertes par effet Joule dans l'induit sont égales aux pertes par effet Joule dans l'inducteur et que le total de ces pertes par effet Joule est égal aux autres pertes. La tension d'alimentation est 200 V. On demande :

a. le courant absorbé par le moteur ;

b. la résistance de l'induit et celle de l'inducteur ;

c. la résistance du rhéostat de démarrage, le courant admissible au départ est 20 A ;

d. la longueur, la section et la masse de fil utilisé pour ce rhéostat (densité de courant 4 A/mm², masse spécifique du conducteur 8,4 g/cm³, résistivité 30 μΩ . cm). (E. N. P.)

32 — Un moteur shunt est alimenté par un secteur continu à 120 V. La résistance de l'induit est 0,5 Ω, celle des inducteurs 80 Ω ; le courant total absorbé est 37,5 A ; la vitesse normale est 1 800 t/mn. On demande :

a. l'intensité du courant d'excitation i ;

b. l'intensité du courant induit I ;

c. la force contre-électromotrice du moteur ;

d. la puissance mécanique du moteur en watts et en chevaux-vapeur (frottements négligés) ;

e. la valeur du couple moteur ;

f. les pertes par effet Joule dans les inducteurs et dans l'induit.

g. Si on admet au démarrage I = 48 A, calculer la résistance du rhéostat de démarrage pour protéger l'induit. (B. E. I.)

33 — Une dynamo à excitation indépendante présente entre ses bornes une tension U = 125 V lorsque, tournant à la vitesse de 1 380 t/mn, elle fournit une puissance P = 10 kW.

a. Une modification du circuit d'alimentation fait tomber la charge de la dynamo à une puissance fournie P′ = 2 kW. Que devient la tension aux bornes ?

b. On veut ramener la tension à sa valeur normale 125 V par modification de la vitesse, l'excitation restant constante ; quelle doit être la vitesse de la machine délestée, de telle sorte qu'elle fournisse la puissance P′ = 2 kW sous la tension 125 V ?
Résistance de l'induit prise entre balais r = 0,2 Ω.
On néglige les effets de la réaction magnétique de l'induit. (B. E. I.)

34 — Une dynamo bipolaire shunt porte un induit de 300 brins actifs tournant dans un flux utile de 0,01 Wb à la vitesse de 2 400 t/mn.
En régime normal, les inducteurs et rhéostat de champ ont une résistance de 100 Ω, la machine débite 10 A sous 110 V.
Le circuit extérieur comprend, en dérivation, 11 lampes de 50 W et une batterie d'accumulateurs 80 V - 1 Ω, munie d'un rhéostat de réglage. Calculer :

a. la force électromotrice de la dynamo et la résistance de l'induit ;

b. le courant qui charge la batterie et la résistance utile du rhéostat de réglage dans les conditions données.

TABLE DES MATIÈRES

ÉLECTROCINÉTIQUE

DOCUMENTATION

MAGNÉTISME. ÉLECTROMAGNÉTISME

APPLICATIONS

Les Éditions FOUCHER
128, rue de Rivoli - Paris (1er).
N° 1498-1159.

Imprimé en France.

Imprimerie CRÉTÉ Paris,
Corbeil-Essonnes.
N° 2009-12-59.

FOUCHER

le Livre au service du Métier